tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 56 nr. 4 1991

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
Postbus 39, 2260 AA Leidschendam. Gironummer 94746
t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

De vereniging stelt zich ten doel het wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de elektronica en de informatietransmissie en -verwerking te bevorderen en de verbreiding en toepassing van de verworven kennis te stimuleren.

Het genootschap is lid van de Convention of National Societies of Electrical Engineers of Western Europe (Eurel).

BESTUUR

Ir. J.B.F. Tasche, voorzitter
J.M. Scarr M.A., secretaris
Ir. J. van Egmond, penningmeester
Ir. P.R.J.M. Smits, programma commissaris
Dr. Ir. N.H.G. Baken
Dr. Ir. J.W.M. Bergmans
Dr. Ir. R.C. den Dulk
Ir. O.B.M. Pietersen
Ir. P.P.M. van de Zalm

LIDMAATSCHAP

Voor lidmaatschap wende men zich tot de secretaris.
Het lidmaatschap staat open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maakt. De contributie bedraagt *f* 60,– per jaar.

Studenten aan universiteiten en hogescholen komen bij gevorderde studie in aanmerking voor een junior-lidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs die publicatie van hun wetenschappelijk werk in het tijdschrift wensen, wordt verzocht in een vroeg stadium contact op te nemen met de voorzitter van de redactiecommissie.

De teksten moeten, getypt op door de redactie verstrekte tekstbladen, geheel persklaar voor de offsetdruk worden ingezonden.

Toestemming tot overnemen van artikelen of delen daarvan kan uitsluitend worden gegeven door de redactiecommissie. Alle rechten worden voorbehouden.

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt *f* 60,–. Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Tarieven en verdere inlichtingen over advertenties worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

REDACTIECOMMISSIE

Ir. M. Steffelaar, voorzitter
Ir. C.M. Huizer
Dr. Ir. W.M.C.J. van Overveld

ONDERWIJSCOMMISSIE

Prof. Dr. Ir. W.M.G. van Bokhoven, voorzitter
Ir. J. Dijk, vice-voorzitter
Ir. R. Brouwer, secretaris

SENSOREN

Inleiding door de voorzitter van de lezingendag 12-6-91

Ir. C. Huber
Technische Universiteit Eindhoven

SENSORS. The short introduction by the chairman of the conference reflects on the importance sensors have gained due to the rapid expansion of electronic information processing capabilities. On the international scene there exists a strong drive to replace the conventional sensor production methods by those that have proven so successful in the electronics field. The lectures have been chosen to give the audience a feeling for the kind of work that is being done on the micro-machining of sensor structures and their integration with micro-electronic circuitry.

Een vluchtig onderzoek leert dat het woord 'sensor' tien tot vijftien jaar geleden nauwelijks nog voor kwam in onze woordenboeken (zie b.v. [1]). In technische kringen bezigde men toen veelvuldig het woord 'opnemer' of 'meetopnemer'. Intussen is door de enorm toegenomen algemene en wereldwijde belangstelling voor sensoren dit internationaal aanvaarde woord ook in de Nederlandse woordenschat doorgedrongen [2], hoewel de omschrijvingen die in de woordenboeken verschijnen nog enigszins onwennig overkomen [3], [4].

Sensoren zijn er in talloze verschijningsvormen en men kan deze naar verschillende gezichtspunten indelen. Een groot percentage sensoren wordt voor meetdoeleinden gebruikt. Meestal gaat het daarbij om het elektrisch meten van niet-elektrische grootheden. De meeste informatieverwerkende systemen zijn thans immers elektronisch van aard en de grote belangstelling gaat daarom ook uit naar het verkrijgen van signalen die hierbij passen. Meetsensoren kunnen wij voor ons doel daarom omschrijven als:

Inrichtingen die een te meten niet-elektrische ingangsgrootheid volgens een nauwkeurig bekende mathematische relatie vertalen naar een elektrisch uitgangssignaal.

Daarnaast kennen wij ook nog **weergavesensoren** zoals mikrofoons en camera's; en **schakelsensoren** zoals IR-detektoren, rookmelders, niveauschakelaars enz. Wat deze allen gemeen hebben is het elektrisch zijn van hun uitgangssignaal. In de toekomst zal men misschien meer gebaat zijn bij optische uitgangssignalen, maar onze huidige informatieverwerkende apparatuur is hoofdzakelijk elektronisch, en door sensoren op deze apparatuur aan te sluiten kunnen systemen gemaakt worden die als het ware intelligent reageren op stimuli van buitenaf. Om het volle profijt hieruit te halen moet echter de sensortechnologie, die lang op het klassieke niveau was blijven steken, nog de inhaalmanoeuvre voltooien waar de onderzoekers wereldwijd mee bezig zijn: de overgang naar de mikrotechnologie. Ons thema van vandaag weerspiegelt deze richting.

In Nederland wordt veel werk verricht op het gebied van sensoren en sensortoepassingen, maar de zwaartepunten voor het specifieke onderzoek naar *mikro-elektronische* realisaties liggen in Delft en Twente. Vandaar dat de sprekers van deze lezingendag uit de daar gevestigde universiteiten voortkomen.

De commerciële aktiviteit gebaseerd op industriële produktie van mikro-elektronische sensoren op grotere schaal laat in Nederland echter nog veel te wensen over. Kennelijk ontbreekt vooralsnog de grote visie die nodig is om het marktrisiko aan te durven. U zult echter in twee bijdragen kennis nemen van het pioneerswerk van twee jonge ondernemingen in deze.

Tien voordrachten op één dag leveren een goed gevuld programma. Toch is het slechts een kleine, zij het ook redelijk representatieve, kijk in de keuken van de moderne sensortechnologen. De organisatoren willen graag hun dank betuigen aan de sprekers die door hun inzet deze dag mogelijk hebben gemaakt.

LITERATUUR

[1] Dale, Van; Groot Woordenboek der Nederlandse Taal.
Nijhoff, Den Haag, 10e druk, 1976
Het woord **sensor** *is niet opgenomen; wel:* **sensorieel, sensorisch,** betrekking hebbend op de zintuigelijke waarneming.

[2] Herziene Woordenlijst van de Nederlandse taal.
SDU uitgeverij, Den Haag, 1990
sensor, m., sensoren *of* -s. *(is daar aangegeven als een "nieuwe ingang").*

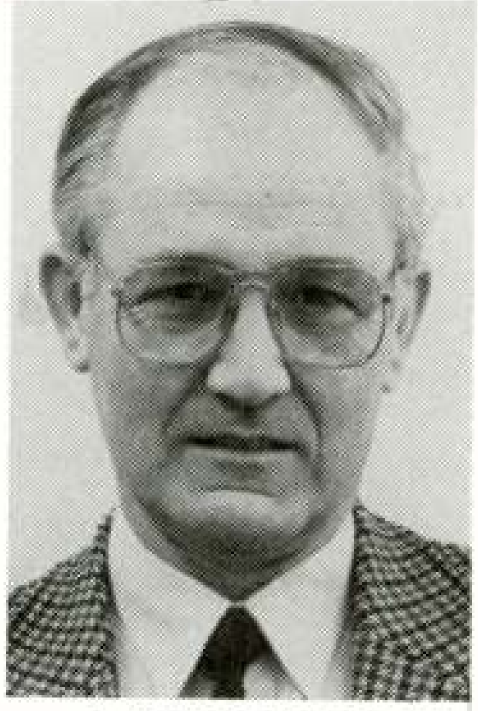
[3] Dale, Van; Groot woordenboek der Nederlandse taal.
Van Dale Lexicografie, Utrecht, 11e druk, 1984
sensor, (<Eng), m. (-en), schakeltoestel bij elektronische apparatuur dat bij aanraken in werking wordt gesteld.

[4] Dale, Van; Groot woordenboek van hedendaags Nederlands.
Van Dale Lexicografie, Utrecht, 1984
sensor, (de ~ (m.); -en) z.n. (aftastend onderdeel van een) zeer gevoelig waarnemingsinstrument.

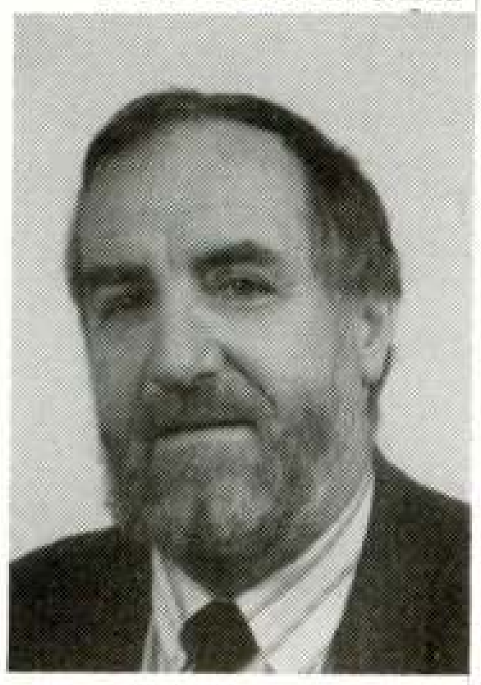
Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.



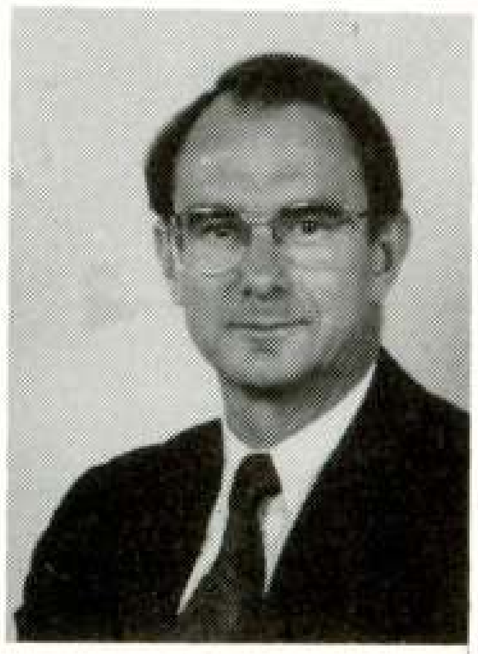
C. HUBER



S. MIDDELHOEK



J. H. J. FLUITMAN



J. H. HUIJSING



P. V. LAMBECK

NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
THE INSTITUTION OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS
BENELUX SECTION
AUDIO ENGINEERING SOCIETY
388e werkvergadering

UITNODIGING voor de lezingendag op woensdag 12 juni 1991, in zaal 1 van het rekencentrum van de TU Eindhoven.

THEMA: MIKRO-ELEKTRONISCHE SENSOREN

PROGRAMMA:

09.20 - 09.50 uur :	Ontvangst, koffie
09.50 - 10.00 uur:	Inleiding door de dagvoorzitter **IR. C. HUBER**, TU Eindhoven
10.00 - 10.25 uur:	Sensoronderzoek aan de TU Delft **PROF. DR. IR. S. MIDDELHOEK**, TU Delft
10.25 - 10.50 uur:	Sensoronderzoek aan de Universiteit Twente **PROF. DR. J. H. J. FLUITMAN**, MESA Research Institute, UT *)
10.50 - 11.15 uur:	ISFET s **PROF. DR. IR. P. BERGVELD**, MESA Research Institute, UT *)
11.15 - 11.40 uur:	**PAUZE**
11.40 - 12.05 uur:	Mikromechanische sensoren in silicium **DR. M. ELWENSPOEK**, MESA Research Institute, UT *)
12.05 - 12.30 uur:	Mikromechanische structuren voor optische sensoren **DR. IR R. F. WOLFFENBUTTEL**, TU Delft
12.30 - 13.30 uur:	**LUNCH**
13.30 - 13.55 uur:	Geïntegreerde intelligente sensoren **PROF. DR. IR. J. H. HUIJSING**, TU Delft
13.55 - 14.20 uur:	Smart sensors met duty cycle output **DR. IR. G. C. M. MEYER**, TU Delft
14.20 - 14.45 uur:	Smart sensors met digitale output **IR. F. R. RIEDIJK**, TU Delft
14.45 - 15.10 uur:	**PAUZE**
15.10 - 15.35 uur:	Geïntegreerde optische sensoren **DR. P. V. LAMBECK**, MESA Research Institiute, UT *)
15.35 - 16.00 uur:	Infrarood-detectoren **DR. IR. S. v. HERWAARDEN**, XENSOR b.v. , Delft
16.00 - 16.30 uur:	**PANELSESSIE**
16.30 uur:	**AFSLUITING**

*) UT = Universiteit Twente

Aanmelding voor deze dag dient te geschieden vóór 29 mei door middel van aangehechte kaart, gefrankeerd met een postzegel van 55 cent. Leden van NERG, IEEE, AES en studenten hebben gratis toegang. Studenten kunnen tevens gratis de lunch gebruiken. De kosten van deelname voor niet-leden bedragen f 15,00. De kosten voor de lunch zijn f 15,00. Betalingen dienen vóór 29 mei te zijn ontvangen op girorekening 164515 t.n.v. Penningmeester NERG, Postbus 39, 2260 AA Leidschendam. Aanname geschiedt in volgorde van binnenkomst.

Leidschendam, mei 1991

Namens de samenwerkende verenigingen
Ir. P. R. J. M. Smits
Tel. 070-3323600

Sensoronderzoek aan de TU Delft

S. Middelhoek
Vakgroep Elektronische Instrumentatie
Faculteit der Elektrotechniek
Technische Universiteit Delft

Sensor research at Delft University of Technology. Since 1974 the laboratory for Electronic Instrumentation has been active in the field of silicon sensors. A large number of sensors for various measurands have been designed and realized. The present objective of the research program is to realize one-chip smart sensors that measure physical and chemical signals and that produce a bus compatible output. The chip should also contain circuits and other sensors to compensate for the non-ideal behaviour of the sensing element.

1 Introductie

Elektronische meet- en regelsystemen of in het algemeen informatieverwerkende systemen bestaan, zoals Fig.1 laat zien, uit drie blokken: een ingangstransducent, een signaalbewerkende eenheid en een uitgangstransducent. In de ingangstransducent, meestal

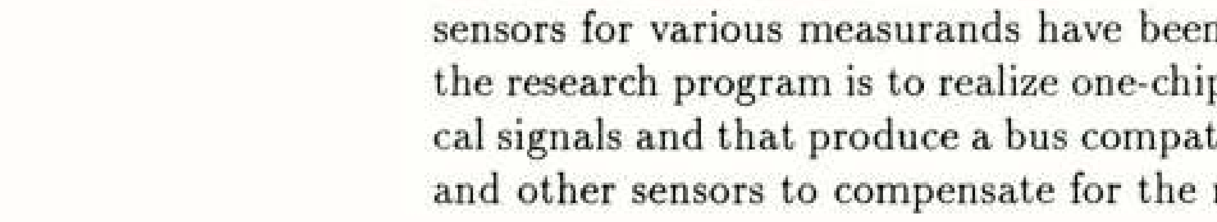


Figure 1: Blokschema van een informatieverwerkend systeem

sensor genoemd, wordt een fysische of chemische grootheid zoals lichtintensiteit, druk, temperatuur, magnetische veldsterkte, pH, etc. omgezet in een elektrisch signaal. In de signaal verwerkende eenheid wordt dit elektrische signaal verwerkt, bijvoorbeeld versterkt. In een display als uitgangstransducent wordt tenslotte de informatie zichtbaar gemaakt.

Sinds de uitvinding van de geïntegreerde schakeling in 1961 is door de elektronische industrie zeer veel aandacht besteed aan componenten voor signaalbewerking, zodat we nu over een veelheid van elektronische bouwstenen beschikken met een uitstekende prestatie/prijs verhouding. Voor een grootschalige invoering van micro-elektronische bouwstenen in nieuwe en bestaande produkten zijn echter ook nieuwe ingangs- en uitgangstransducenten nodig met een vergelijkbare prestatie/prijs verhouding. Het is daarom, dat in vele universitaire en industriële laboratoria in de gehele wereld ijverig gezocht wordt naar nieuwe sensorprincipes en sensormaterialen. Gezien het succes van silicium bij het vervaardigen van geïntegreerde schakelingen ligt het voor de hand dat ook de toepasbaarheid van silicium voor sensoren op vele plaatsen wordt onderzocht. Het relevante vakgebied wordt meestal aangeduid met de benaming geïntegreerde silicium sensoren.

Het onderzoek aan silicium sensoren begon in Nederland reeds heel vroeg. De onderzoeker Gieles van het Philips Nat. lab. in Waalre lukte het reeds in 1969 om miniatuur drukopnemers in silicium te vervaardigen [1]. Ook Bergveld maakte in datzelfde jaar zijn eerste pH gevoelige silicium sensoren [2]. Toen in 1974 de Faculteit der Elektrotechniek in Delft de beschikking kreeg over een IC atelier, startte ook in Delft het wetenschappelijk onderzoek naar silicium sensoren. Reeds in hetzelfde jaar lukte het van Putten om een zeer gevoelige windsnelheidsmeter in silicium te vervaardigen [3]. Sindsdien hebben vele medewerkers, studenten en promovendi in Delft een groot aantal in silicium vervaardigde sensoren voor fysische en chemische parameters bedacht en door het IC atelier laten vervaardigen.

2 Doelstelling

Alvorens de resultaten van deze activiteiten op een systematische wijze te presenteren, is het goed hier eerst de belangrijkste doelstelling van het Delftse onderzoekprogramma nader uiteen te zetten. Informatie-verwerkende systemen zijn tegenwoordig opgebouwd uit tamelijk goed gedefinieerde modulen. Zo bestaat bijvoorbeeld een PC globaal uit een toetsenbord, een microprocessor, een intern geheugen, een extern geheugen en een monitor. Omdat de in- en uitgangen van deze componenten erg goed zijn gedefinieerd is het mogelijk componenten, die vervaardigd zijn door fabrikanten verspreid over de gehele wereld, te gebruiken om een PC te assembleren.

Wat voor een PC nu geldt, zal in de toekomst voor bijna alle meet- en regelsystemen gaan gelden. In de toekomst zal een systeemingenieur met een sensor, die geen goed gedefinieerde uitgang heeft, weinig meer kunnen aanvangen. De sensor zal daarom in de toekomst niet meer als sensorelement maar als een sensormodule moeten worden aangeboden. Deze module zal in elk geval een sensorelement bevatten, maar daarnaast ook versterkerschakelingen, schakelingen voor analoog/digitaal conversie, andere sensoren voor het compenseren van een ongewenste kruisgevoeligheid voor bijvoorbeeld temperatuur, schakelingen voor het compenseren van offset, drift, niet-lineariteit, etc. en zal ook schakelingen moeten bevatten om het uitgangssignaal in een bus-compatibel formaat om te zetten. Voorlopig zal een module nog uit vele losse componenten zijn opgebouwd, maar, daar het sensorelement ook in silicium kan worden vervaardigd, moet het in de toekomst mogelijk zijn, de gehele sensormodule op één chip in silicium te integreren. We spreken dan van een geïntegreerde smart sensor. Is de sensormodule uit losse componenten opgebouwd, dan spreken we van een hybride smart sensor.

De sensorgroepen in Delft hebben als doel gesteld, in de komende jaren, een flink aantal geïntegreerde smart sensoren te ontwerpen en te laten vervaardigen. Ze worden hiertoe in staat gesteld door een nauwe samenwerking met het nieuwe Delftse Instituut voor Micro-Elektronica en Sub-micron technologie DIMES en ruime steun van STW, FOM en industrie.

3 Projecten

Het gebied van de geïntegreerde smart sensoren laat zich tamelijk goed in drie delen opsplitsen. In de eerste plaats is het noodzakelijk kennis te hebben van de fysische effecten, die in silicium voorkomen en voor sensorelementen kunnen worden gebruikt. Ook is een grote kennis van de voor siliciumsensoren nodige processtappen noodzakelijk. In de tweede plaats probeert men met behulp van de beschikbare effecten en technologie silicium sensoren te maken voor een veelheid van fysische en chemische parameters. Tenslotte moet

men een groot aantal elektronische schakelingen ontwikkelen, die geschikt zijn om op de sensorchip te worden geïntegreerd en die ervoor moeten zorgen dat goed gedefinieerde uitgangssignalen worden verkregen.

Op alle drie gebieden is de Delftse sensorgroep actief. Het is natuurlijk onmogelijk om alle projecten, waaraan in de afgelopen 25 jaar met succes is gewerkt, hier kort te bespreken. De projecten zijn daarom in drie tabellen opgenomen en bij elk project is, waar mogelijk, de belangrijkste publikatie aangegeven, zodat de geïnteresseerde lezer van de meeste projecten verdere informatie in de wetenschappelijke literatuur kan vinden.

TABEL 1 Classificatie en sensortechnologie

- **Classificatie van sensoren en effecten:**
  - zelfgenererende en modulerende sensoren [4]
  - definitie van 6 signaaldomeinen, gebaseerd op thermodynamische principes [5]
  - kontaktloos detecteren van fysische en chemische parameters
  - tandem transducenten [4]
- **Materiaalfysica:**
  - op microgolfreflectiemetingen gebaseerde kontaktloze meting van de levensduur in silicium [6]
- **Sensortechnologie:**
  - ZnO technologie [7]
  - hoogohmig silicium [8]
  - volume en oppervlakte etsen van silicium
  - elektrochemische etsstop [9]
  - PVDF technologie [10]
  - Polysilicon [11]
  - epitaxiale laterale overgroei

Het tweede gebied omvat de siliciumelementen voor het meten van fysische en chemische parameters. Het is internationaal gebruikelijk om de te meten parameters onder te verdelen in 6 zogenaamde signaaldomeinen. Delft is actief op alle signaaldomeinen en de belangrijkste projecten zijn in Tabel 2 opgesomd.

TABEL 2 Silicium sensoren

- **Sensoren voor het meten van straling**
  - kleurensensor [12]
  - microstrip-detectoren voor nucleaire straling [13]
  - sensoren voor zachte Röntgenstraling [14]
  - thermische infrarood-sensoren [15]
  - silicium lichtmodulatoren [16]
  - elektrisch programmeerbare UV siliciumdetectoren [17]
  - pyroelektrische infrarood-sensoren [10]
- **Sensoren voor het meten van mechanische grootheden**
  - positie sensoren gebaseerd op het laterale foto-elektrische effect [18]
  - thermische gasstroomsensoren [19]
  - thermische versnellingsopnemer [20]
  - thermische vacuüm sensoren [21]
  - elektronisch waterpas [22]
  - tactiele robotsensoren [23]
  - magnetische meting van spanning en verplaatsing in IC behuizingen [24]
  - optische hoekverdraaiingssensoren [25]
  - capacitieve hoekverdraaiingssensoren [26]
- **Sensoren voor het meten van thermische signalen**
  - PTAT sensor gebaseerd op intrinsieke band-afstand referenties [27]
  - thermische sensor gebaseerd op een gespreide weerstand
  - silicium thermozuilen [28]
  - lateraal-veld silicium temperatuur sensoren [29]
- **Sensoren voor het meten van elektrische velden**
  - Micro-elektronische huidelektrode [30]
- **Sensoren voor het meten van magnetische velden**
  - Hall plaatjes
  - magnetotransistoren voor twee- en driedimensionale veldmetingen [31]
- **Sensoren voor het meten van chemische concentraties**
  - dauwpunt vochtigheidssensor [32]
  - gassensor gebaseerd op oppervlaktegolfresonatoren [33]
  - capacitieve gas sensoren [34]

Het derde gebied omvat onderzoeksprojecten, die te maken hebben met het ontwerpen van elektronische schakelingen, die het sensorsignaal zodanig bewerken, dat het geschikt wordt om aan andere systeemcomponenten toe te voeren.

TABEL 3 Elektronische schakelingen

- **Elektronische signaalbewerking**
  - flip-flop sensoren [35]
  - programmeerbare oppervlakte golffilters [36]
  - 1.0 Volt operationele versterkers [37]
  - sub-femtoFarad capaciteitsmetingen gebaseerd op fasemetingen [38]
  - geïntegreerde thermische oscillatoren met duty-cycle output [39]
  - brug-naar-frequentie omzetters [40]
  - thermische sigma-delta modulator [41]
- **Smart sensoren:**
  - "spinning current" Hallplaat met lage offset [42]
  - offset-correctie-methode gebaseerd op het variëren van de gevoeligheid [31]
  - smart stralingsdetectoren [43]
  - smart thermische sensoren met digitale output [44]
  - smart positiegevoelige sensor [45]
  - smart gasstroomsensoren met digitale output [41]
  - dynamische sensorcalibratie met EEPROMs [46]
  - compatibiliteit van silicium sensoren met bipolaire uitleeselektronica [47]
  - niet-lineaire A/D omzetting [48]
- **Bus systemen**
  - geïntegreerde sensorbus gebaseerd op de RS 422 standaard [49]

Literatuur

[1] A.C.M. Gieles, Subminiature silicon pressure transducer, Digest IEEE ISSCC, Philadelphia, 108-109, 1969.

[2] P. Bergveld, Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements, IEEE Trans. Biomed. Eng. 19, 70-71, 1970.

[3] A.F.P. Putten and S. Middelhoek, Integrated silicon anemometer, Electron. Lett. 10, 425-426, 1974.

[4] S. Middelhoek and S.A. Audet, Silicon Sensors, Academic Press, London, 1-376, 1989.

[5] D.C. van Duyn and S. Middelhoek, Information transduction in solid-state transducers: a general thermodynamic systems approach, Sensors and Actuators, A21-A23, 25-32, 1990.

[6] T. Otaredian, S. Middelhoek and M.J.J. Theunissen, A microwave method for contactless measurement of the lifetime of free carriers in silicon wafers, Journal de Physique, 49, C4.145-148, 1988.

[7] M.J. Vellekoop, C.C.G. Visser, P.M. Sarro and A. Venema, Compatibility of zinc oxide with silicon IC processing, Sensors and Actuators, A21-A23, 1027-1030, 1990.

[8] S.A. Audet and E.M. Schooneveld, High-purity silicon radiation-sensor array, Nucl. Instrum. Methods, A275, 517-526, 1989.

[9] P.M. Sarro and A.W. van Herwaarden, Silicon cantilever beams fabricated by electrochemically controlled etching for sensor applications, J. Electrochem. Soc. 133, 1724-1729, 1986.

[10] P.C.A. Hammes and P.P.L. Regtien, An integrated infrared matrix sensor using the pyroelectric material PVDF, Proc. EUROSENSORS V, Rome, Sept.30-Oct.2, 1991, to be published.

[11] M.R. Wolffenbuttel, Polysilicon bridges for the realization of tactile sensors, Proc. EUROSENSORS IV, Karlsruhe, Oct.1-3, 1991, to be published.

[12] R.F. Wolffenbuttel and G. de Graaf, Performance of an integrated silicon colour sensor with a digital output in terms of response to colours in the colour triangle, Sensors and Actuators, A21-A23, 574-580, 1990.

[13] W.R.Th. ten Kate, The silicon microstrip detector, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-141, 1987.

[14] S.A. Audet, E.M. Schooneveld, S.E. Wouters and M.H. Kim, High-purity silicon soft X-ray imaging sensor array, Sensors and Actuators, A21-A23, 482-486, 1990.

[15] P.M. Sarro, Integrated silicon thermopile infrared detectors, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-117, 1987.

[16] R.F. Wolffenbuttel and T.A. Kwa, Integrated monochromator fabricated in silicon using micromachining techniques, Proc. TRANSDUCERS'91, San Francisco, June 24-27, 1991, to be published.

[17] R.F. Wolffenbuttel, Photodiodes in silicon with an electrically-programmable UV response, Sensors and Actuators, A21-A23, 559-563, 1990.

[18] D.J.W. Noorlag, Lateral-photoeffect position-sensitive detectors, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-211, 1982.

[19] B.W. van Oudheusden, Integrated silicon flow sensors, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-184, 1989.

[20] R. Hiratsuka, D.C. van Duyn, T. Otaredian and P. de Vries, A novel accelerometer based on a silicon thermopile, Proc. TRANSDUCERS'91, San Francisco, June 24-27, 1991, to be published.

[21] A.J.W. Herwaarden, Thermal vacuum sensors based on integrated silicon thermopiles, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-162, 1987.

[22] Y. Xing, An electronic spirit level tilt sensor, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-146, 1989.

[23] P.P.L. Regtien, Integrated tactile imaging sensor, Proc. TRANSDUCERS'87, Tokyo, June 2-5, 451-456, 1987.

[24] A. Bossche and J.R. Mollinger, On-chip metal deformation measurements: a magnetic approach, Sensors and Actuators, A21-A23, 754-757, 1990.

[25] T.A. Kwa and R.F. Wolffenbuttel, An integrated high-resolution optical angular displacement sensor, Proc. TRANSDUCERS'91, San Francisco, June 24-27, 1991, to be published.

[26] R.F. Wolffenbuttel and R.P. van Kampen, An integratable capacitive angular displacement sensor with improved linearity, Proc. EUROSENSORS IV, Karlsruhe, Oct.1-3, 1991, to be published.

[27] G.C.M. Meijer, Thermal sensors based on transistors, Sensors and Actuators 10, 103-125, 1986.

[28] A.W. van Herwaarden, D.C. van Duyn, B.W. van Oudheusden and P.M. Sarro, Integrated thermopile sensors, Sensors and Actuators, A21-A23, 621-630, 1989.

[29] R.W. Wolffenbuttel, Bipolar-process-compatible lateral-field silicon temperature sensor with charge injection, Sensors and Actuators, A21-A23, 639-644, 1990.

[30] F.Z. Padmadinata, J.J. Veerhoek, G.J.A. van Dijk and J.H. Huijsing, Microelectronic skin electrode, Sensors and Actuators, B1, 491-494, 1990.

[31] S. Kordic, Offset reduction and three-dimensional field sensing with magnetotransistors, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-234, 1987.

[32] P.P.L. Regtien, Silicon dew-point sensor for accurate humidity measurement systems, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1-139, 1981.

[33] A. Venema, E. Nieuwkoop, M.J. Vellekoop, W.J. Ghijsen, A.W. Barendsz and M.S. Nieuwenhuizen, NO_2 gas-concentration measurement with a SAW-chemosensor, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, UFFC-34, 148-155, 1987.

[34] E.C.M. Hermans, CO, CO_2, CH_4 and H_2O sensing by polymer covered interdigitated electrode structures, Sensors and Actuators, 5, 181-186, 1984.

[35] W. Lian, Integrated silicon flip-flop sensors, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1-127, 1989.

[36] J.C. Haartsen and A. Venema, A novel junction surface acoustic wave detector in silicon, Sensors and Actuators, A21-A23, 675-678, 1990.

[37] M.J. Fonderie and J.H. Huijsing, An operational amplifier with 1 V rail-to-rail multi-path-driven output stage, Tech. Digest ISSCC, San Francisco, Feb. 13-15, 2.76-2.77, 1991.

[38] R.F. Wolffenbuttel and P.P.L. Regtien, Capacitance-to-phase angle conversion for the detection of extremelv small capacities, IEEE Trans. Instrum. and Meas., IM-36, 868-872, 1987.

[39] Y. Pan, F.R. Riedijk and J.H. Huijsing, A new class of integrated thermal oscillators with duty-cycle output for application in thermal sensors, Sensors and Actuators, A21-A23, 655-659, 1990.

[40] J.H. Huijsing, G.A. van Rossum and M. van der Lee, Two-wire bridge-to-frequency converter, IEEE J. Solid-State Circ. SC-22, 343-349, 1987.

[41] J.K. Zelisse, F.R. Riedijk and J.H. Huijsing, Thermal sigma delta modulator for wind speed and direction measurement, Proc. EUROSENSORS V, Rome, Sept.30-Oct.2, 1991, to be published.

[42] P.J.A. Munter, A low-offset spinning current Hall plate, Sensors and Actuators, A21-A23, 743-746, 1990.

[43] S.E. Wouters, T. Otaredian and E.M. Schooneveld, A novel diffusion-based silicon nuclear radiation detector, Proc. EUROSENSORS IV, Karlsruhe, Oct.1-3, 1991, to be published.

[44] H.J. Verhoeven, F.R. Riedijk and J.H. Huijsing, A smart bipolar thermal flow sensor with frequency output, Proc. TRANSDUCERS'91, San Francisco, June 24-27, 1991, to be published.

[45] T. Smith and J.H. Huijsing, An integrated linear position detector with digital output, Proc. TRANSDUCERS'91, San Francisco, June 24-27, 1991, to be published.

[46] P.P.L. Regtien and P.J. Trimp, Dynamic calibration of sensors using EEPROMs, Sensors and Actuators, A21-A23, 615-618, 1990.

[47] R.F. Wolffenbuttel and K.M. Mahmoud, Compatibility between micromechanical sensors and bipolar readout electronics, Proc. EUROSENSORS V, Rome, Sept.30-Oct.2, 1991, to be published.

[48] R.F. Wolffenbuttel, Analog circuit for interfacing silicon optical sensors and driving a dual-slope A/D converter for logarithmic readout, Sensors and Actuators, A21-A23, 603-609, 1990.

[49] M.J. Rutka and R.F. Wolffenbuttel, Integrated sensor bus interface in silicon based on the RS 422 standard, Proc. EUROSENSORS V, Rome, Sept.30-Oct.2, 1991, to be published.

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

ONDERZOEK AAN SENSOREN EN ACTUATOREN IN HET MESA-RESEARCH INSTITUUT VAN DE UNIVERSITEIT TWENTE

Prof. Dr. J.H.J. Fluitman
Universiteit Twente
Postbus 217
7500 AE Enschede

Summary.
This paper reviews the research on sensors and actuators at the MESA Research Institute of the University of Twente. The historical development in the field of micro electronics, storage technology and optical wave guides is sketched as a background for the development of the research at the institute.
A view on the future is given with "integration" and "micro system engineering" as keywords.

---

1. Inleiding

Het MESA-Research instituut van de Universiteit Twente concentreert zich op ontwerp en ontwikkeling van geïntegreerde schakelingen, sensoren en actuatoren. Wat deze laatste componenten betreft ligt de nadruk op de micro-technologie, dat wil zeggen dat een generatie sensoren en actuatoren wordt onderzocht, die in het spoor van de microelectronica (en mogelijk daarmee samengebouwd) vergelijkbare technologieën voor de realisatie exploiteert.

Het onderzoek bestrijkt een breed terrein van transductiemechanismen en dat is kenmerkend voor het Twentse onderzoek. Veel aandacht wordt geschonken aan materiaalkundige aspecten en aan de technologie. Het instituut heeft een flexibel Clean Room laboratorium tot haar beschikking met een (Bi)CMOS proceslijn voor de realisatie van IC's en een grote variatie aan depositie- en etsapparatuur, waarmee kan worden voldaan aan de nogal uiteenlopende wensen van de ontwerpers van sensoren en actuatoren.

Om het ontstaan van het instituut te verklaren is het interessant om naar de technologische ontwikkelingen van de achterliggende twintig jaar te kijken en dat zullen we in het volgende hoofdstuk voor een aantal gebieden doen.

Daarna geven we kort weer hoe de ontwikkelingen in Twente zijn verlopen en hoe het onderzoek zich heeft geconcentreerd tot een organisatorische eenheid met de in de aanhef genoemde doelstelling.

Vervolgens geven we een overzicht van de activiteiten en verwijzen naar de meest recente literatuur daarover.

Tenslotte schetsen we het perspectief, waarbij de term integratie in meerdere betekenissen een rol speelt. Met name op de integratie die leidt tot micro-systemen wordt het vizier gesteld.

2. Twintig jaar technologische ontwikkeling

Van het grootste belang voor alle technologische vooruitgang is de ontwikkeling van de microelectronica. In tabel 1 zijn enkele markante momenten op de tijdlijn vanaf 1970 aangegeven.

In 1970 waren al een groot aantal transductiemechanismen in silicium gerealiseerd, o.a. leidend tot de Hall-sensor, de ISFET, de stralings(optisch)gevoelige opnemers en zelfs de membraan-druksensor was reeds geconcipieerd. Het is echter de doorbraak van de microprocessor, die geleid heeft tot het concept van de monolithische "smart sensor".

In 1972 kwamen de eerste simpele pocketcalculators in de handel, rond 1974 was de 8-bits microprocessor te koop, een kleine 10 jaar later de 32-bits microprocessor. Deze opmars, van simpele calculator tot PC, heeft een sfeer gecreëerd van "alles is mogelijk" en niet onterecht. De impact van de microelectronica is tot in alle hoeken van de maatschappij merkbaar en heeft een revolutionair karakter.

De "smart sensor" was een universeel concept waarbij uitgegaan werd van een siliciumstructuur, waarin vrijwel alle transductiemechanismen voorhanden zijn en die, samengevoegd met intelligente schakelingen, inzetbaar was voor vrijwel iedere sensorbehoefte, zolang die binnen een redelijk temperatuurgebied (tot b.v. 120 graden) bleef. Zo'n sensor zou op grote schaal kunnen worden geproduceerd en aldus voldoen aan de door de microelectronica zelf voortgestuwde behoefte aan goedkope sensoren, alsmede aan de behoefte van de IC-producenten, die hier een aantrekkelijke uitbreiding van hun producten in zagen.

De weg naar de "smart sensor" is lang en moeilijk gebleken. De grote specificiteit van sensoren leidt bij nader inzien tot grote problemen, die geen generiek karakter hebben, maar sensor voor sensor moeten worden opgelost. Het begrip "smart sensor" heeft zich daaraan wat aangepast, in de huidige betekenis is het een "black box" met aan de ingang de te meten grootheid en aan de uitgang een "fatsoenlijk" digitaal signaal dat aan een microprocessor kan worden aangeboden, monolythisch geïntegreerd of hybride doet niet zozeer ter zake.

Binnen de "black box" voltrekt zich langzaam de fysische integratie. Op het ogenblik zijn er sensoren samengebouwd met electronische schakelingen, die uit functionele overwegingen op dezelfde chip aanwezig moeten zijn, maar die nog geen intelligentie aan de sensor toevoegen. Deze "integrated sensors" bereiken nu de markt, maar zijn nog niet in commerciële producten te vinden. We komen nog terug op deze integratie.

De micromechanica heeft sinds de zeventiger jaren zijn invloed steeds meer doen gelden. Silicium als mechanisch materiaal geeft aanleiding tot perfecte constructies, die kunnen worden toegepast in sensoren en actuatoren. Aan het eind van de tachtiger jaren is de "surface micromachining" doorgebroken. Door onderetsing via "opofferingslagen" worden nu planaire structuren gerealiseerd, die vrij beweegbaar zijn in het vlak en karakteristieke diktematen hebben in de orde van grootte van een micron. Elektrostatische micromotoren en tandwielmechanismen kunnen worden uitgeëtst, zodat een complete (platte) machinerie ontstaat, die kan worden ondergebracht op een vierkante millimeter silicium. De grote variëteit en de dichtheid waarmee mechanische constructies op een chipoppervlak kunnen

tijdas			
			Optische glasvezel (u)
↓		Magnetic bubble memory (u)	
	Silicium membranen (u)		Integrated optics (u)
1970	ISFET (u)	Floppy disc (u) 1 Kbit RAM (m)	
	Pocket-calculator (m)	Magn.rec. dichtheid 10^6 bits/inch^2 (m)	
↓	8-bits micro processor (m)		Optische glasvezelsensoren (u)
	Algemene groei van zowel Si-georiënteerde als glasvezel-georiënteerde sensor "bewustwording".		
↓		Loodrechte magn. recording (u)	
		Magn.rec. dichtheid 10^7 bits/inch^2 (m)	
1980	Eerste tijdschriften verschijnen die volledig gewijd zijn aan de nieuwe generatie sensoren en actuatoren.		
	"Silicon as a mechanical material" (Petersen)		
↓	32-bits micro processor (m)		Integrated optics sensors (u)
		Flop van de magn. bubble geheugens	
↓	Surface micro machining (u)		
			Scanning tunneling en atomic force microscopie (m)
1990	Integrated sensors (u,m)	4 Mbit RAM (m)	
	Micro engineering wordt meer en meer nano engineering!		

Tabel 1

Voor de sensor- en actuatorresearch relevante ontwikkelingen in de technologie. De tussen haakjes geplaatste letters (u) en (m) betekenen "uitvinding" resp. "marktintroductie".

worden gerealiseerd heeft al geleid tot het begrip "smart actuator", maar het is verstandiger om maar direct over de "integrated actuator" te spreken als een redelijk haalbare optie.
Deze doorbraak heeft overigens opnieuw de siliciumtechnologie in betekenis doen toenemen.

Een tweede lijn in de tijd die van belang is om te volgen is die betreffende de computergeheugens, zowel de interne als de externe. In 1970 was er sprake van de z.g. access-gap. Enerzijds waren er de snelle maar dure electronische geheugens (1K-chips), juist bezig om de oude ringkerntjes te vervangen, anderzijds de langzame maar goedkope perifere geheugens (schijvengeheugens ter grote van een flinke koelkast, tapegeheugens van nog groter volume als back-up).

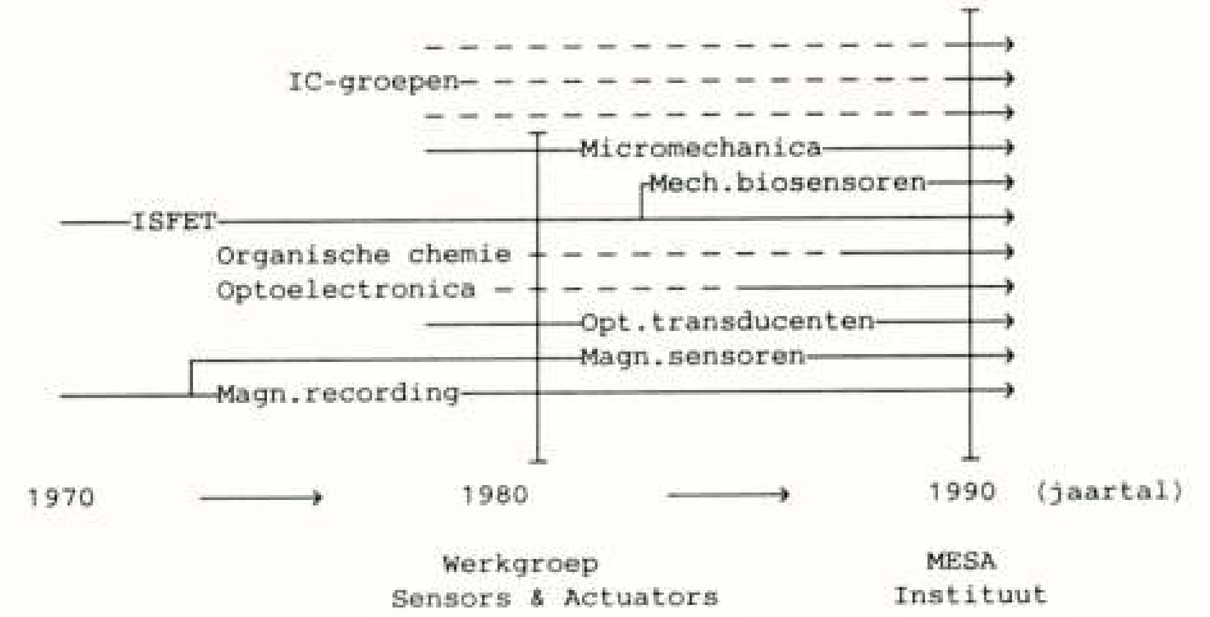
Er was een markt voor een intermediair geheugen, niet te duur maar wel redelijk snel toegankelijk. De kaarten waren gezet op het magnetische bubble-geheugen en er was een gigantische research gaande om dit geheugen te realiseren als verkoopbaar product. Dat is niet gelukt.
De prijs/prestatie verhouding bleef te hoog en inmiddels rukte de microelectronica van de ene kant op en werd aan de andere kant in de magnetische recording het ene record na het andere gebroken m.b.t. de bitdichtheden.
In die tijd werd door IBM de floppy disc ontwikkeld als program loader voor een van de grote machines. Deze floppy disc is uiteindelijk een geweldig succes geworden omdat de PC werd geboren, maar in 1970 was er niemand die de PC voorzag, laat staan de floppy disc als PC-geheugen ontwikkelde. Dus, terwijl het met fantastische prognoses begeleide bubble geheugen ten onder ging, viel bij de ontwikkeling van de microprocessor in de richting van de PC, de floppy disc uit de hemel en werd een kassucces. Dat betekende uiteraard een geweldige push voor de magnetische recording.
Nu zijn er feitelijk twee typen van overschrijfbare geheugens van formaat: het halfgeleidergeheugen - op steeds meer volgepakte en grotere chips - en het magnetische recording geheugen - het meubel van weleer past nu in de binnenzak.

De derde lijn, die we volgen is die van de optische communicatie. In 1970 bestond de glasvezel reeds en deze ontwikkelde zich snel tot een verliesarm communicatiemedium, waarmee grote informatiepakketten over grote afstand konden worden verzonden.
In de zeventiger jaren is tevens de glasvezel ontdekt als basis voor optische sensoren. Dit type sensoren heeft grote voordelen: de sensor is geïntegreerd in de communicatielijn, ze is ongevoelig voor EMI en kan in explosieve omgeving veilig worden toegepast. Ook de medische wereld heeft een grote belangstelling aan de dag gelegd. De glasvezel lijkt te zijn gebouwd voor toepassing in een katheter. De verbinding naar de tip is niet elektrisch van aard en de vezel neemt nauwelijks ruimte in beslag. De biomedische wereld is trouwens altijd geïnteresseerd in miniaturisatie en als zodanig eveneens een "driver" voor silicium-sensoren.
Hoewel het onderzoek aan siliciumsensoren een dominante positie inneemt in de literatuur is het verrassend te ontdekken, dat de patenten die worden genomen op glasvezelsensoren in aantal die van de siliciumsensoren verre overtreffen (1).
In het spoor van de glasvezeltechnologie is de "integrated optics" tot ontwikkeling gekomen. Deze geïntegreerde optische schakelingen worden ontwikkeld met het oog op snelle optische signaalverwerking, maar kunnen tevens dienen als basis voor sensoren, omdat het licht in de dunne golfgeleiders een beetje naar buiten kijkt en aldus chemische substanties op het oppervlak kan waarnemen. Voor chemische sensoren is dit een zeer interessantie optie. Chemische materialen zijn via hun (o.a. optische) spectrum uniek herkenbaar.

3. Ontwikkelingen in het sensoronderzoek aan de universiteit Twente

De in het vorige hoofdstuk beschreven ontwikkelingen hebben alle hun invloed gehad op de research in het huidige MESA-instituut, zij het niet altijd even duidelijk herkenbaar en rationeel.
In tabel 2 geven we de groei en de concentratie van het onderzoek schematisch weer.

In 1970 werd de ISFET uitgevonden door Bergveld en het ISFET-onderzoek heeft zich, niet alleen aan de UT maar wereldwijd ontwikkeld. Elders in dit blad zult u kennis kunnen nemen van de laatste ontwikkelingen



Tabel 2 Ontstaansgeschiedenis van het huidige MESA Research Instituut.

op dit gebied aan de UT.

Ongeveer tezelfder tijd is onderzoek gestart aan magnetische recording en dat onderzoek heeft nog steeds een dikke poot in het programma. Als spin-off is onderzoek gedaan aan magnetische sensoren en daaruit zijn een aantal interessante ontwerpen naar voren gekomen, die nog steeds in de belangstelling staan.

Rond 1980 is onderzoek gestart naar optische glasvezelsensoren en werd de micromechanica geïntroduceerd.

Deze activiteiten vonden plaats in verschillende vakgroepen van de faculteit Elektrotechniek. Om het onderzoek beter te kunnen coördineren en ook om de steeds duurder wordende technologische faciliteiten gemeenschappelijk te kunnen aanschaffen en beheren is in 1982 de werkgroep Sensors & Actuators (S&A) opgericht en werd het eerste Clean Room laboratorium voor de fabricage van sensoren en actuatoren ingericht.

De faculteit beschikte al over een dergelijk laboratorium voor het IC-onderzoek, maar in het nieuwe laboratorium mocht worden geëxperimenteerd met "incompatibele" processen en materialen, die in een standaard IC-lab. niet worden getolereerd.

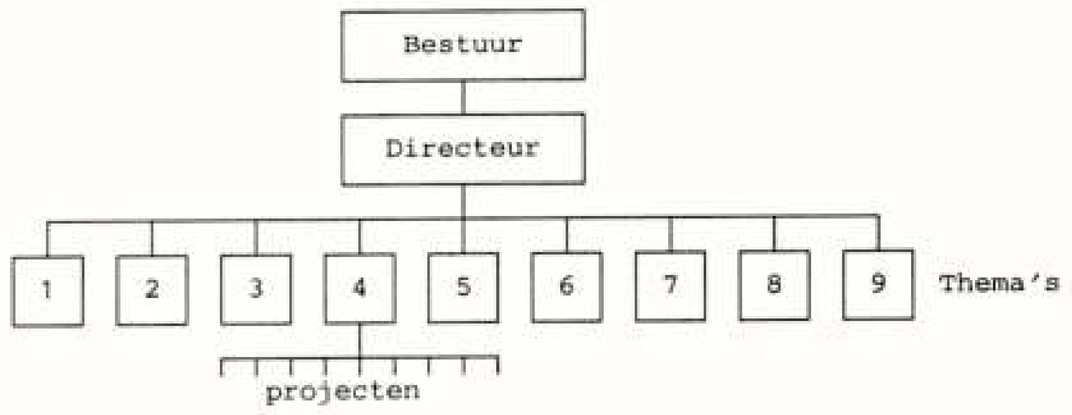
In de loop van het onderzoek werden de banden met onderzoekers uit andere faculteiten aangehaald. Het bleek dat sensoren ten behoeve van de detectie van chemische substanties de kennis vereiste van de chemie en de biochemie. Zowel vanuit de optische hoek als vanuit het ISFET-onderzoek was expertise nodig inzake de creatie van (bio)chemisch selectieve lagen voor de detectie van stoffen. Anderzijds was bij de nieuwe groepen een duidelijke belangstelling voor sensoronderzoek aanwezig en zo groeide de werkgroep uit met groepen vanuit de faculteiten Technische Natuurkunde en Chemische Technologie.

Aan het eind van de jaren tachtig werd besloten tot de bouw van een geheel nieuw Clean Room laboratorium, voor zowel de IC-activiteiten als de activiteiten met betrekking tot sensoren en actuatoren. Ook werd de omzetting van de werkgroepvorm naar de instituutsvorm voorbereid, hetgeen uiteindelijk leidde tot een fusie van de S&A-groep en de IC-groep in het MESA-instituut. MESA is een acroniem voor: Micro Electronics, Materials Engineering, Sensors & Actuators.

4. S&A-activiteiten in het MESA-instituut

In het instituut worden negen thema's bewerkt (2) (tabel 3), waarvan er drie de microelectronica betreffen. Hoewel deze groepen zich niet specifiek met sensoren en actuatoren bezighouden, wordt de interactie, of misschien beter gezegd de "integratie" van electronica met sensoren en actuatoren in toenemende mate gerealiseerd.

Een vierde thema houdt zich bezig met magnetische en magneto-optische recording, maar heeft ook magnetische sensoren t.b.v. hoek- en positiedetectie in haar portefeuille (3).



Thema's (roepnaam in het engels):

1. IC-Process and device technology
2. Biosensors
3. Lightwave devices
4. Optoelectronics
5. Molecular engineering
6. Micromechanical transducers
7. Analog, time discrete and adaptive circuits
8. Testable design and testing of digital IC's
9. Information storage technology

Tabel 3

Organisatiestructuur van het MESA Research Instituut. Er zijn ongeveer 130 personen betrokken in het onderzoek, verdeeld over ongeveer 70 projecten.

De groep "lightwave devices" onderzoekt de mogelijkheden van de geïntegreerde optica t.b.v. "sensing" en houdt zich tevens bezig met transducenten, b.v. schakelaars, t.b.v. de optische telecommunicatie (4).

De enigszins verwante groep "optoelectronics" concentreert zich op microdiagnostische technieken en systemen en combineert optische golfgeleiders met biologisch materiaal t.b.v. sensoren (5).

De groep "micromechanical transducers" houdt zich bezig met sensoren en actuatoren waarbij de micromechanica (van met name silicium) een dominante rol heeft (6).

De groep "biosensors" concentreert zich op sensoren t.b.v. de medische diagnostiek en het milieu, waarbij de ISFET en afgeleiden daarvan een centrale plaats innemen. Ook is in deze groep een mini-microfoon t.b.v. gehoorapparaten ontwikkeld (7).

De groep "molecular engineering", tenslotte, houdt zich bezig met het ontwerpen en realiseren van moleculaire lagen, die als chemisch selectief venster worden aangebracht op daartoe geschikte detectoren (8).

5. Monolythische en hybride integratie

We komen terug op de "integrated sensor", waarvan in hoofdstuk 2 sprake was. Men kan daarbij het standpunt innemen om de intrinsieke sensoreigenschappen van het silicium te benutten, teneinde sensor en electronica binnen een standaardproces te ontwerpen en te realiseren. Dit is het uitgangspunt, waarmee onze Delftse collega's hun successen oogsten.

Een meer "rekkelijk" standpunt is dat, waarbij de electronica eerst op de plak wordt gezet om vervolgens in een "post-process" de plak te bewerken met "niet-compatibele" processtappen en materialen. Het "post-process" moet dan wel zo zijn ontworpen, dat de gerealiseerde schakelingen niet worden aangetast in hun functioneren.

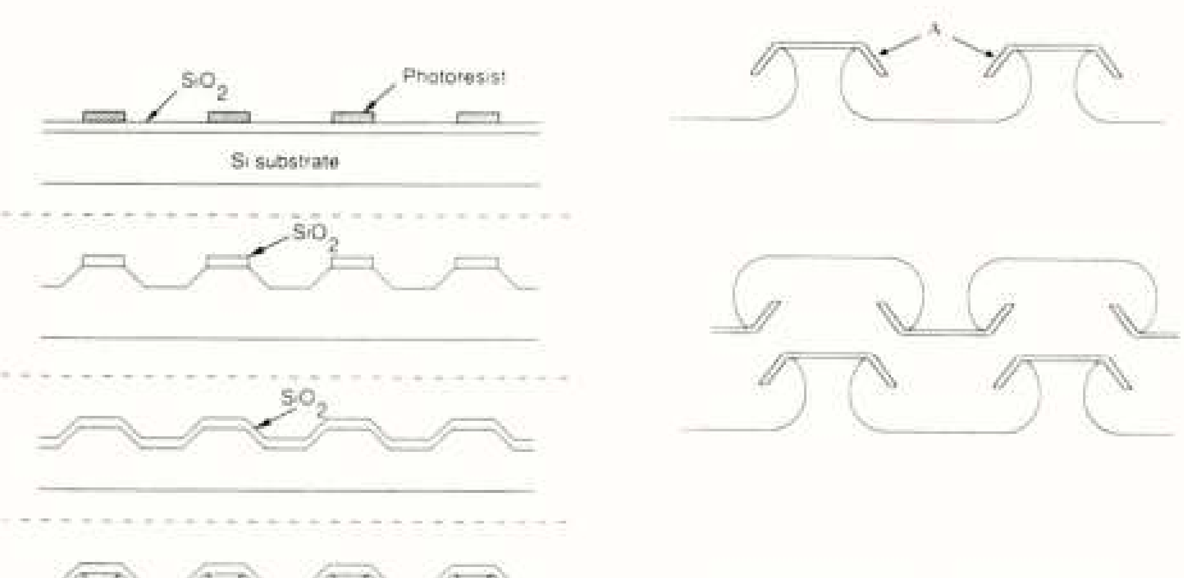
"Post-processing" is een must voor de micromechanische sensoren als druksensoren, accelerometers, flowsensoren, etc. waarbij in het initiële

proces de voorbereiding wordt getroffen voor de uiteindelijke etsstappen, waarmee de micromechanische structuren vrij worden gemaakt. Deze micromechanische sensoren, met hun noodzakelijke "post-processing steps" beginnen zo langzamerhand gemeengoed te worden in het repertoire van de "integrated sensor".

Men kan ook denken aan de introductie van IC-onvriendelijke materialen als NiFe en ZnO via "post-processing". De haalbaarheid van deze procesvoering is voor de genoemde materialen aangetoond. Dit betekent dat de vrijheid voor de ontwerpers van in batch geproduceerde (waferscale-processing) sensoren en actuatoren niet principieel beperkt is tot standaard IC-technologie, maar het blijft een feit dat de compatibiliteitsproblematiek sensor voor sensor moet worden opgelost en dat het IC-proces en het "post-process" tegelijkertijd moet worden ontworpen om te komen tot het meest rendabele ontwerp, waarmee de competitie met de hybride duidelijk in kaart moet worden gebracht.

Met het oog op de hybride, i.e. de niet monolythische constructie, worden de grenzen overigens steeds minder scherp, omdat er steeds slimmere fusiestappen worden ontwikkeld. Met "fusiestap" wordt hier bedoeld, de stap waarmee bouwstenen (electronisch) worden verbonden, zoals met de klassieke draadbonding. De methoden waarmee chips met elkaar elektrisch en thermisch kunnen worden verbonden nemen toe in variëteit en betrouwbaarheid.

Men kan plakken met elkaar verbinden via metallische "bumps", eventueel voorbereid door het maken van throughholes. De micromechanici hebben inmiddels gedemonstreerd dat plak op plak montage ook kan geschieden door arrays van "paddestoeltjes" uit te etsen, waarmee naar elkaar toegekeerde oppervlakken in elkaar kunnen worden gedrukt (9) (zie figuur 1, vgl. klittenband). Dit biedt perspectief op harde en halfharde verbindingen, die naar keuze elektrisch geleidend kunnen worden gemaakt. Ook de niet elektrische bonding technieken waarmee siliciumplakken kunnen worden verbonden en gestapeld (anodic bonding, direct bonding, glass seal bonding, etc.) maakt de overgang van hybride naar monolythisch in het spraakgebruik steeds eenvoudiger.



Figuur 1.
Links: Fabricageproces van, in dit geval, SiO_2 kapjes als paddestoelen op een Si-waferoppervlak.
Rechts: Bevestiging van twee naar elkaar toegekeerde oppervlakken (vlgs. lit. verw. 9).

6. Micro-systems en micro-engineering

De stapeltechniek zoals die aan het einde van het vorige hoofdstuk aan de orde kwam, wekt de suggestie van een drie dimensionale structurering van systemen. Men hoeft zich daarbij niet te beperken tot louter electronische functies als sensoren en actuatoren, maar men kan het denken verplaatsen naar de micro system engineering, waarbij ingewikkelde functies in een "geïntegreerd" systeem worden gerealiseerd. De huidige technologie opent het perspectief op dergelijke systemen.

Het begrip "integratie" komt daarbij in twee betekenissen aan de orde. De eerste betekenis is die van de functionele integratie. Moderne systeem ontwerpers moeten van meet af aan de verschillende disciplines, die in het product aan de orde komen, rond de tafel hebben. Partitionering van delen, die later worden samengevoegd kan leiden tot suboptimalisatie van het ontwerp. Het besef, dat "integraal" moet worden ontworpen vindt zijn weg in nieuwe termen als "mechatronica, telematica, chemtronica, etc.

De tweede betekenis is de fysische integratie, dat wil zeggen het tot een geheel samenbouwen van een product via een procesmatig batch-productieproces. Deze productiewijze kan veelal een gevolg zijn van het integrale ontwerpproces en deze integratie volgt dan het spoor van de integratie in zijn eerste betekenis.

Laten we de disciplines eens op een rijtje zetten:
Micro optics
Micro electronics
Micro magnetics
Micro mechanics
Micro fluidics
(Bio)chemistry +
Micro systems engineering

We zullen een aantal microsystemen noemen waarbij deze integrale vorm van engineering aan de orde komt. We laten daarbij onze fantasie de vrije loop.

** Aan de UT is een mini-microfoon t.b.v. gehoorapparaten ontwikkeld in silicium en deze wordt samengebouwd met electronica (versterking) en een luidsprekertje. Men kan ook denken aan een "kunstoor" waarbij in een integraal ontwerp een microsysteem het beschadigde gehoor vervangt en dus niet een compenserende geluidversterking in serie zet met een beschadigd gehoororgaan. Het beoogde systeem kan direct aangrijpen op een punt waar de transductie naar het biologische mechanisme het meest efficiënt of het best uitvoerbaar is.

** De druk in de oogbol wordt geregeld doordat voortdurend vloeistof wordt aangemaakt en "op geregelde wijze" weglekt. Wanneer dit weglekken wordt verhinderd zal de druk in het oog toenemen en dat kan tot ernstige problemen, zelfs tot blindheid, leiden. Men kan dit probleem in principe oplossen door een kunstmatig "lek" met een instelbaar afsluitklepje te maken. Dit hele systeem moet, inclusief het regelmechanisme zo klein zijn, dat het zonder hinder voor de patiënt op de oogbol kan worden geplaatst.

** Kunstmatige organen en "intelligente medicijntoediening". Vele lichaamsfuncties worden geregeld via biochemische processen. Daarbij roept de aanwezigheid van bepaalde stoffen op tot een actie, die resulteert in de toevoer van andere, voor goed fysiek functioneren benodigde stoffen. Wanneer het lichaam op bepaalde punten in dit opzicht niet goed functioneert kan men denken aan microsystemen met chemisch gevoelige sensoren, die zonodig een mechanisme in werking stellen waarmee andere stoffen kunnen worden toegevoegd.

** Chirurgische operaties moeten met steeds geringere belasting voor de patiënt, steeds sneller, accurater en goedkoper kunnen geschieden. Een microinstrumentarium op de tip van een katheter is daarvoor een vereiste. De specialist, die de ingreep verricht moet deze micro- machinerie kunnen bedienen met normale handgrepen en hij of zij moet tijdens de operatie

nauwkeurig kunnen volgen wat er gebeurt.

** De medische wereld is een dankbaar applicatiegebied voor microsystemen, dat is inmiddels wel duidelijk. Maar het op afstand bestuurbare micromechaniek zal ook daarbuiten kunnen worden ingezet voor inspectiedoeleinden op plaatsen, die voor macromechanieken onbereikbaar zijn.

** Voor de analyse van stoffen in een chemisch of klinisch laboratorium is een minimale hoeveelheid van de te analyseren stof nodig, terwijl het aantal handelingen voor de analyse een zekere hoeveelheid tijd vraagt. De hoeveelheid te analyseren stof, alsmede de tijd voor de analyse kan drastisch worden gereduceerd door een micro "fluid injection analysis" systeem. Via een doseersysteem worden daarin uitermate kleine hoeveelheden stof getransporteerd door een neutrale dragervloeistof naar een b.v. optisch analyse-station. Doordat de te analyseren stof wordt geïnjecteerd in de dragervloeistof (die alle geïnjecteerde stof meevoert, zonder dat deze met de wanden van het systeem in aanraking komt) hoeft de apparatuur niet te worden schoongemaakt en kan continu, stof na stof worden geïnjecteerd en geanalyseerd.

** Als laatste voorbeeld richten we de aandacht op micro- manipuleermechanieken. De noodzaak daarvoor wordt ingegeven door de fabricagetechniek van IC's en microsystemen, waarvoor clean rooms met apparatuur worden gebruikt met een totaal volume, dat vele grootteordes verschilt van het totale volume aan materiaal dat onder behandeling is. De clean room van het MESA-instituut heeft, inclusief het luchtbehandelingsysteem, een volume van ca. 7000 m^3 . Dat is een factor 10^7 meer dan er aan silicium rondgaat op een normale dag. Nu is deze clean room voor researchdoeleinden ingericht en niet voor productie. Laat dat nu eens een factor 100 schelen dan nog is de verhouding 10^5, en dit vraagt om een totale herziening van het productieproces en de introductie van micromanipulatoren.

7. Conclusie

Het onderzoek in het MESA-instituut richt zich op de ontwikkeling van microcomponenten, zoals IC's, sensoren en actuatoren. De integratie van microelectronica met elektrische schakelingen binnen één ontwerp, of zelfs monolythisch samengebracht, loopt vooruit op een nog verder gaande integratie, waarin van meet af aan alle benodigde disciplines in het spel moeten worden betrokken. Deze ontwikkelingen vragen veel tijd en veel geld, maar bieden een perspectief op ongekende mogelijkheden. Als men bovendien ziet waar men in de "Far East" en de "Far West" mee bezig is, dan zal deze investering in tijd en geld gedaan moeten worden om internationaal in de pas te blijven en soms misschien zelfs een beetje vooruit te lopen.

Literatuur:

1. D.J. Mobbs and D. Summerhayes, "Optical/microelectronic sensor patents reviewed", Sensor Review, Vol. 9, pp. 95-104 (1989).
2. Brochure betreffende het onderzoekprogramma, de faciliteiten en de organisatie van het MESA instituut. Op aanvraag verkrijgbaar bij de auteur.

3a. T. Wielinga, J.H.J. Fluitman and J.C. Lodder, "Perpendicular standstill recording in CoCr-films", IEEE Trans. Magn. MAG-19, pp. 94-104 (1983).

3b. J.P.J. Groenland, C.J.M. Eijkel, J.H.J. Fluitman and R.M. de Ridder, "Permalloy thin-film magnetic sensors", accepted for publication in Sensors and Actuators.

4. . Zie de bijdrage van Dr. P. Lambeck in dit nummer.

5a. R.G. Heideman, R.P.H. Kooyman and J. Greve, "Simple interferometer for Evanescent Field Refractive Index Sensing as a Feasibility Study for an Immunosensor", Applied Optics, Vol. 30, pp. 1474-1479 (1990).

5b. N.F. van Hulst, N.P. de Boer and B. Bolger, "Scanning Near Field Optical Microscopy", Transactions of the Royal Microscopical Society, Vol. 1, pp. 239-242 (1990).

6. Zie de bijdrage van Dr. M. Elwenspoek elders in dit nummer.

7a. Zie de bijdrage van Prof.Dr. P. Bergveld elders in dit nummer.

7b. J.A. Voorthuyzen, P. Bergveld and A.J. Sprenkels, "Semiconductor-based electret sensors for sound and pressure", IEEE Trans.on Electr. insulation, Vol. 24, pp. 267-276 (1989).

8. D.N. Reinhoudt, "Molecular systems for the transduction of host-guest complexation reactions into electronic signals", Proc.Ann.Int.Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol. 12, pp. 1749-1750 (1990).

9. H. Han, M.L. Reed and L.E. Weiss, "A mechanical surface adhesive using micromachined silicon structures", J. Micromech. Microeng., Vol. 1, pp. 30-33 (1991).

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

MIKROMECHANISCHE STRUCTUREN IN SILICIUM VOOR OPTISCHE SENSOREN

R.F. Wolffenbuttel

Technische Universiteit Delft,
Faculteit der Elektrotechniek,
Vakgroep Elektronische Instrumentatie,
Mekelweg 4, 2628 CD Delft

Abstract

Micromachining for application in silicon radiant sensors: Micromachining techniques are widely employed for the fabrication of integrated silicon micromechanical sensors and actuators. These micromachining techniques have emerged as a logical extension of the basic microelectronic fabrication technology. The driving forces pushing the advances in this technology are mainly from the pressure sensor and the accelerometer, however, the results have also found widespread application in non-micromechanical devices. This paper provides a survey of the impact of micromachining technologies on radiant sensors in silicon. Both the bulk and the surface micromachining have been employed for the realisation of various new types of radiant sensors. Moreover, the performance of certain conventional radiant sensor types is greatly enhanced by subjecting the sensor structure to a micromachining step. The micromachining technology involved is usually adopted after successful implementation in a micromechanical sensor, which limits the impact of these efforts on the technology and seemingly results in a one-way traffic from technology research towards this branch of sensor research. However, it will be shown that several techniques that have been commonplace in optics can, depending on the definition of micromachining, also be regarded as non-conventional micromachining steps.

Mikromechanica

Een essentieel onderdeel van de konventionele mikro-elektronische technologie in silicium is de selectieve verwijdering, door middel van etstechnieken, van fotolithografisch gedefinieerde laterale delen van een dunne laag. Zoals in Fig. 1 schematisch is weergegeven kan men in een sterk vereenvoudigde voorstelling van de mikro-elektronische fabricage twee typen van deelprocessen aangeven; n.l. het aanbrengen van een dotering in het silicium of het aanbrengen van een interconnectiepatroon. Voor het selectief doteren van de silicium wafer op uitsluitend die laterale delen, welke door het masker zijn gedefinieerd, zal men in eerste instantie een dunne passivatielaag op het silicium substraat laten groeien (b.v. thermisch oxide) of deponeren (silicium-oxide of silicium nitride), waarna het fotoresist wordt aangebracht. Daarna zal via fotolithografie en maskering de posities gedefinieerd worden waar dotering van het onderliggende silicium gewenst is, door de verwijdering van de resist op die gebieden. Vervolgens zal b.v. door middel van een HF ets het silicium-oxide op de onbeschermde delen verwijderd worden. De feitelijke dotering kan nu na een schoonmaakstap door de gaten in het oxide plaatsvinden door depositie of implantatie. Tenslotte zal een temperatuurbehandeling uitgevoerd worden om, in het geval van depositie, de verontreinigingen op goed gedefinieerde wijze in het silicium te laten diffunderen (drive-in) of om, in het geval van implantatie, de stralingsschade te herstellen en de verontreinigingen elektrisch te activeren (anneal). Afhankelijk van de omgevingscondities zal zich gedurende deze temperatuurstap een nieuwe passivatielaag kunnen vormen, waarmee de wafer gereed is voor een nieuwe cyclus van de aangegeven procesgang [1].

Naast het aanbrengen van de dotering dient de wafer in het algemeen een aantal processtappen te doorlopen om de elektrische interconnectie van de diverse geïntegreerde komponenten te kunnen realiseren. In dit geval zal men de locatie van de contactgaten definiëren op de, in het bovenstaande, aangegeven wijze en zal men, na het wegetsen van de contactgaten in de passivatielaag (= dielektricum) een uniforme laag van goed geleidend materiaal (b.v. aluminium) aanbrengen. Daarna zal, via lithografie en maskering, het patroon gedefinieerd worden waar de geleidende laag behouden dient te blijven. Na schoonmaken en sinteren is het geïntegreerde device in het algemeen gereed voor afmontage.

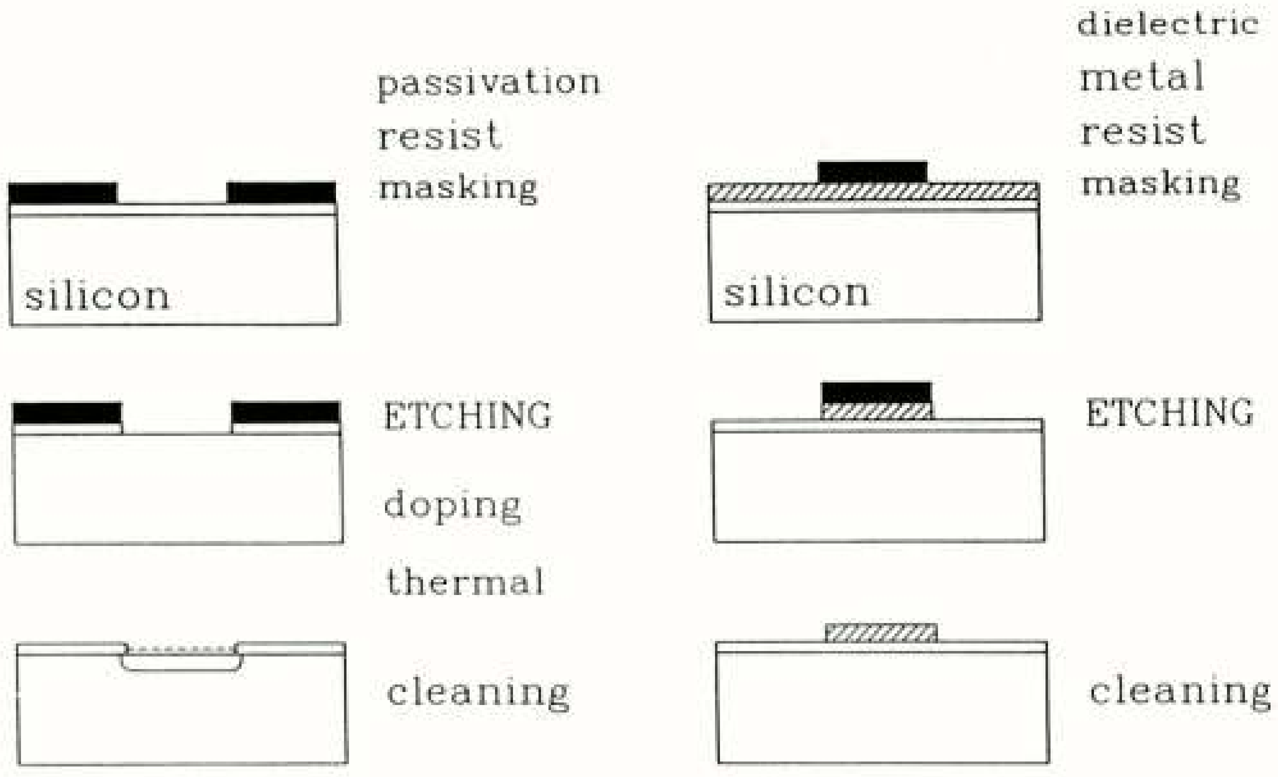


Fig. 1 Vereenvoudigde weergave van de fabricageprocedure voor het aanbrengen van (a) een doteringsprofiel en (b) een interconnectiepatroon.

Wat bij deze sterk vereenvoudigde beschouwing van een mikroelektronisch fabricageproces opvalt is de dwingende noodzaak van een selectieve etsstap om van een fotolithografisch gedefinieerd patroon tot de fysieke realisatie van een doteringsprofiel of een metalisatie te komen. Daarnaast is het van groot belang dat men zich realiseert dat deze etsstap voortvloeit uit een ELEKTRISCHE noodzaak. Het cyclisch uitvoeren van laterale definitie-etsen-doteren-temperatuurstap maakt het mogelijk het gewenste doteringsprofiel te verkrijgen voor de correcte elektronische werking van

een actieve geïntegreerde komponent. Met de interconnectie kunnen de gerealiseerde komponenten op de gewenste wijze geconfigureerd worden tot een elektronische schakeling. In beide gevallen dicteert de elektrische functionaliteit van de halfgeleiderchip als bouwsteen de etsstap.

De mikromechanica komt voort uit deze etsprocessen. Reeds in een vroegtijdig stadium van de technologieontwikkeling ontdekte men de mogelijkheid om met bepaalde etsmiddelen zeer selectief silicium-kompatibele materialen, zoals silicium-oxide of silicium-nitride, te verwijderen zonder het silicium aan te tasten en vice versa [2]. Daarnaast blijkt het mogelijk om silicium langs een voorkeursrichting in het kristal weg te etsen. De etssnelheid is daarbij in een van de kristalrichtingen aanzienlijk lager dan die in de andere richtingen (anisotroop etsen). Hoewel de mikromechanica en de mikroelektronica voortvloeien uit dezelfde basistechniek en beiden het materiaal silicium gemeenschappelijk hebben, vloeit de noodzaak tot etsen bij de mikromechanica niet voort uit een elektrische noodzaak, maar is deze in het algemeen het gevolg van een mechanische of optische functionele randvoorwaarde.

Mikromechanica in silicium kan derhalve gedefinieerd worden als het complex van technieken, welke beschikbaar zijn ten behoeve van de vormgeving van silicium- kompatibele materialen, zonder dat daarvoor een directe elektrische noodzaak aanwezig is.

Mikromechanische sensoren

In principe zijn er drie technieken beschikbaar voor de fabricage van geïntegreerde mikromechanische sensoren in silicium; bulk micromachining, surface micromachining en wafer-to-wafer bonding.

In het geval van bulk micromachining wordt het siliciumoppervlak via gaten in de passivatielaag blootgesteld aan een selectief etsmiddel en wordt silicium uit het substraat verwijderd. Het etsen kan zowel isotroop plaatsvinden (de etssnelheid is gelijk in alle kristalrichtingen) of anisotroop (er is sprake van een voorkeursrichting). Een belangrijk probleem bij deze methode is de noodzaak van een etsstop. Deze vloeit voort uit de disproportie tussen de de gewenste dikte van de mikromechanische structuur (3-10 μm) en de nominale dikte van een standaard 4" wafer (525 μm). De dikte van een balk of membraan bepaalt in hoge mate de gevoeligheid van de resulterende mikromechanische sensor. Over het oppervlak zijn variaties van 10 μm in de substraatdikte mogelijk. Daarnaast is de etssnelheid door de wafer niet over de gehele wafer en op alle dieptes gelijk. Het verwijderen van een laag silicium van het substraat tot 10 μm is derhalve niet goed mogelijk via een tijdets en zou bovendien leiden tot een dunne structuur met een zeer aanzienlijke dikte niet-uniformiteit. Dit probleem is te ondervangen door een automatische etsstop.

Twee methoden zijn mogelijk voor een automatische etsstop. De eerste is gebaseerd op de etsstop op een hoge concentratie Boor. De etssnelheid van silicium in KOH wordt aanzienlijk verlaagd bij een concentratie hoger dan 5.10^{19} cm^{-3}. Men kan deze stop aanbrengen via b.v. een implantatie vanaf de voorzijde van de wafer, waarbij de implantatie-energie de gedimensioneerde diepte bepaalt (projected range). De doses wordt zodanig gekozen, dat de genoemde concentratie op deze diepte wordt overschreden. Etsen vanaf de achterzijde geeft een etsstop op de geprogrammeerde diepte. De implantatie bepaalt dus volledig de dikte van de mikromechanische structuur. Een nadeel van deze methode is de mechanische spanning in het materiaal ten gevolge van de hoge concentratie B.

De tweede methode is gebaseerd op de elektrochemische etsstop bij een gesperde p-n junctie. Een n-type epitaxiale laag met een dikte gelijk aan de gewenste mikromechanische structuur wordt daartoe op een p-type substraat gegroeid. Etsen in b.v. KOH vanaf de achterzijde geeft een etsstop ter hoogte van de junctie.

Bij de surface micromachining worden dunne lagen van silicium-kompatibele materialen op het silicium substraat aangebracht. Door nu eerst een opofferingslaag (sacrificial layer), vervolgens een structurele laag aan te brengen en tenslotte de sacrificial laag selectief weg etsen, is een vrijstaande mikromechanische structuur te realiseren. Een gangbare technologie is gebaseerd op fosfor-gedoteerd silicium-oxide als sacrificial laag (P.S.G.), een polysilicium structurele laag en gebufferd HF als etsmiddel.

De wafer-to-wafer bonding (= fusion bonding of anodic bonding) is een methode voor mikromechanische fabricage op waferniveau. Twee wafers worden daarbij samengevoegd door deze onder hoge temperatuur samen te drukken, waarbij tevens een hoge elektrische spanning wordt aangebracht. De reeds genoemde mikromechanische vormgevingstechnieken kunnen, uiteraard, uitgevoerd worden op de individuele wafers voordat deze worden samengevoegd.

Een grote verscheidenheid van mikromechanische structuren kan men door toepassing van micromachining in silicium, silicium-oxide of silicium-nitride realiseren, zoals eenvoudige groeven en mesa's, maar ook (gedeeltelijk) vrijstaande structuren, zoals membranen, balken en een rotor voor toepassing in een geïntegreerde mikromotor. Fig. 2a toont schematisch een tweetal voorbeelden. In de piezoresistieve versnellingsopnemer wordt een anisotrope ets uitgevoerd met een elektrochemische etsstop om de ophangbalken en de seismische massa te definiëren. In een tweede wafer wordt isotroop een ruimte geëtst voor de bepaling van de demping. De wafers worden samengevoegd door middel van de wafer- to-wafer bonding techniek. In Fig. 2b is aangegeven op welke wijze de surface mikromachining kan worden toegepast om een tastsensor te realiseren.

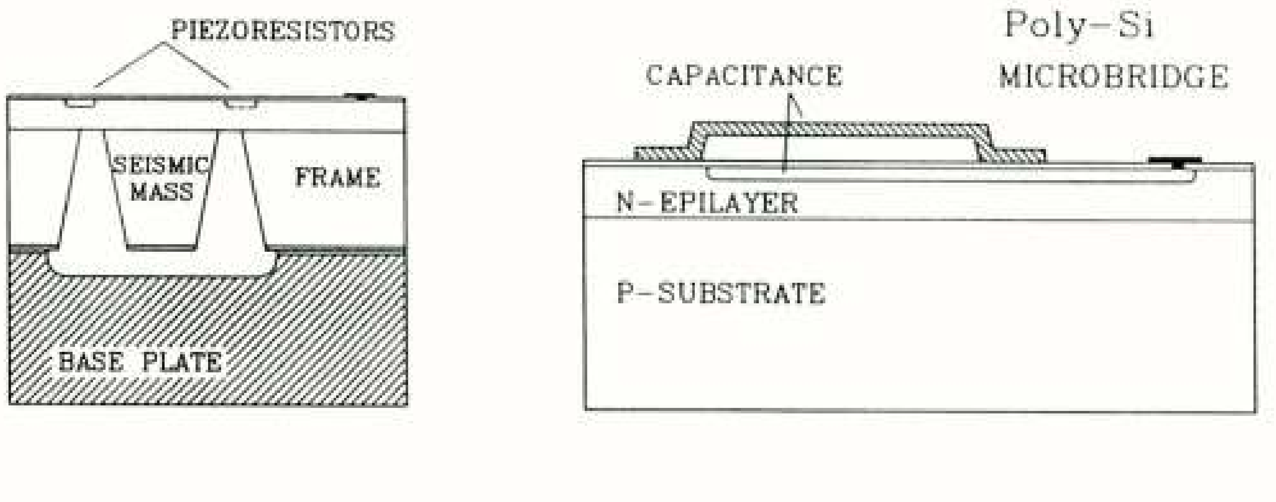


Fig. 2 Schematische voorstelling van (a) versnellingsopnemer, welke is gerealiseerd door toepassing van bulk micromachining en wafer-to-wafer bonding en (b) tastsensor gefabriceerd met behulp van surface micromachining.

In het volgende zal aan de hand van een aantal voorbeelden worden aangetoond dat dezelfde mikromechanische vormgevingstechnieken van groot belang zijn voor optische sensoren in silicium. De betreffende optische sensoren worden daartoe ingedeeld in 3 categorieën. Ten eerste is er sprake van een groep van konventionele optische sensoren waarbij de mikromechanica het mogelijk maakt om de specificaties aanzienlijk te verbeteren, zonder dat het fundamentele werkingsmechanisme beïnvloed wordt. Voorbeelden van optische sensoren uit deze categorie zijn de thermozuil IR-detector en de zonnecel. Daarnaast heeft men een groep van innovatieve optische sensoren ontwikkeld, welke uitsluitend in silicum gerealiseerd kunnen worden dankzij het beschikbaar komen van de mikromechanica. Voorbeelden van dit type van optische sensoren zijn de geïnte-

greerde golfgeleider in silicium, de Fabry-Perot interferometer en de monochromator. Tevens wordt, dankzij de toepassing van de mikromechanica, de uitlezing van een glasfibersensor sterk vereenvoudigd. Tenslotte is er een groep van konventionele optische sensoren, waarin erkende optische technieken, zoals meerlaags interferentiefilters zijn toegepast. Hoewel deze structuren van oudsher bekend staan als optische technieken, vallen deze ook binnen de aangegeven definitie van de mikromechanica.

Micromachining ter verbetering van de specificatie van konventionele optische sensoren

Een thermokoppel is opgebouwd uit twee (half)geleiders met een verschillende Seebeck coëfficiënt, welke aan de uiteinden met elkaar verbonden zijn. Onderbreken van een van de geleiders maakt het mogelijk om het temperatuurverschil tussen de verbindingspunten (de lassen) om te zetten in een elektrische spanning. De gevoeligheid kan verhoogd worden door een thermozuil, waar meerdere thermokoppels elektrisch in serie geplaatst zijn tussen de koude en de warme las. Een geïntegreerde thermozuil in silicium is opgebouwd rond aluminium, welke reeds beschikbaar is voor het interconnect, en gedoteerd silicium, waardoor een gevoeligheid haalbaar is van 1 mV/K/thermokoppel [3]. Door nu een van de lassen te bedekken met een laag van optisch-absorberend materiaal en de tweede las op omgevingstemperatuur te houden, wordt het mogelijk om het, door invallende straling veroorzaakte, temperatuurverschil te meten.

Een probleem dat bij dit type geïntegreerde detector optreedt is de warmtegeleiding in silicium. De strook gedoteerd silicium, welke samen met het aluminium de thermokoppel vormt, is geïntegreerd in het silicium substraat, zodat het bulk silicium thermisch parallel tussen de warme en de koude las geschakeld is. Doordat silicium een zeer goede thermische geleider is, zal straling van zeer hoge intensiteit nodig zijn om een meetbare temperatuurgradiënt over de chip te genereren. Anisotroop bulk micromachining kan worden toegepast als aangegeven in Fig. 3 om het silicium substraat onder de thermozuil te verdunnen, waardoor gevoelige geïntegreerde IR-detectoren in silicium gefabriceerd kunnen worden met een korte responsietijd.

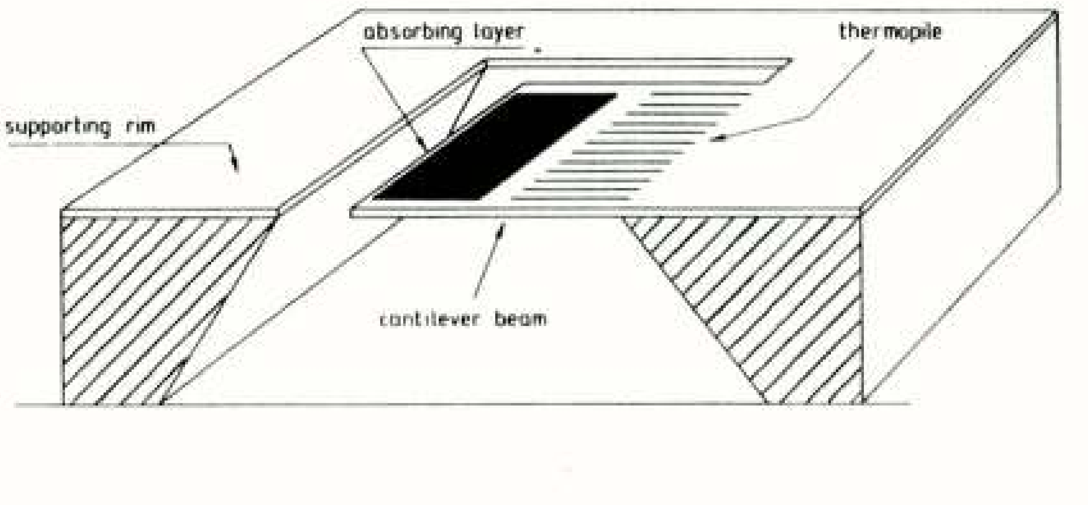


Fig. 3 Geïntegreerde silicium infrarood detector gebaseerd op een thermozuil.

Mikromechanische vormgevingstechnieken spelen ook een belangrijke rol bij de ontwikkeling van zonnecellen met een hoge opto-elektrische conversie efficiëntie. Het totale rendement wordt bepaald door de efficiëntie van de 3 deelprocessen, welke zich afspelen vanaf het moment dat het foton invalt tot en met het moment dat het gegenereerde electron-gat paar gescheiden en verzameld wordt. Ten eerste is er sprake van reflectie van een deel van de invallende fotonen ten gevolge van de reflectie bij de lucht-oxide-silicium multilaag en de reflectie op het interconnectiepatroon, dat een deel van het fotogevoelige oppervlak van de zonnecel afschermt. Vervolgens is er sprake van een interne quantum efficiëntie [4]. Tenslotte worden, ten gevolge van de eindige levensduur van minderheidsladingsdragers, niet alle electron-gat paren in de junctie gescheiden [5]. Mikromachining wordt nu vooral toegepast om de reflectie en de afscherming te reduceren.

Het deel van het oppervlak van de zonnecel dat door het interconnect wordt afgeschermd dient, uiteraard, geminimaliseerd te worden, echter, zonder dat dit aanleiding geeft tot een verlaging van de kortsluitstroom in de cel ten gevolge van een verhoging van de serieweerstand. Om deze reden etst men diepe sleuven in het silicium oppervlak, waarna over het gehele oppervlak in de sleuf gecontacteerd kan worden. Op deze wijze blijft het schaduwoppervlak minimaal, terwijl het contactoppervlak vergroot wordt. De reflectiecoëfficiënt van de cel kan verlaagd worden door toepassing van een anti-reflectie coating en door een textuur aan te brengen in het oppervlak. Hiertoe wordt een epitaxiale laag op het substraat gegroeid met daarin koolstofverontreinigingen, gevolgd door een anisotrope ets in KOH [6]. Elk SiC deeltje fungeert gedurende de ets als startpunt en dus ook als de apex van een pyramide. Een invallend foton dat reflecteert tegen een zijde van een pyramide is daardoor invallend op de zijde van een andere pyramide. Daarbij treedt voor de tweede maal reflectie en transmissie op, zodat de totale transmissie wordt verbeterd. De oppervlaktestructuur van een zonnecel, waarin beide technieken zijn toegepast, is schematisch aangegeven in Fig. 4 [7].

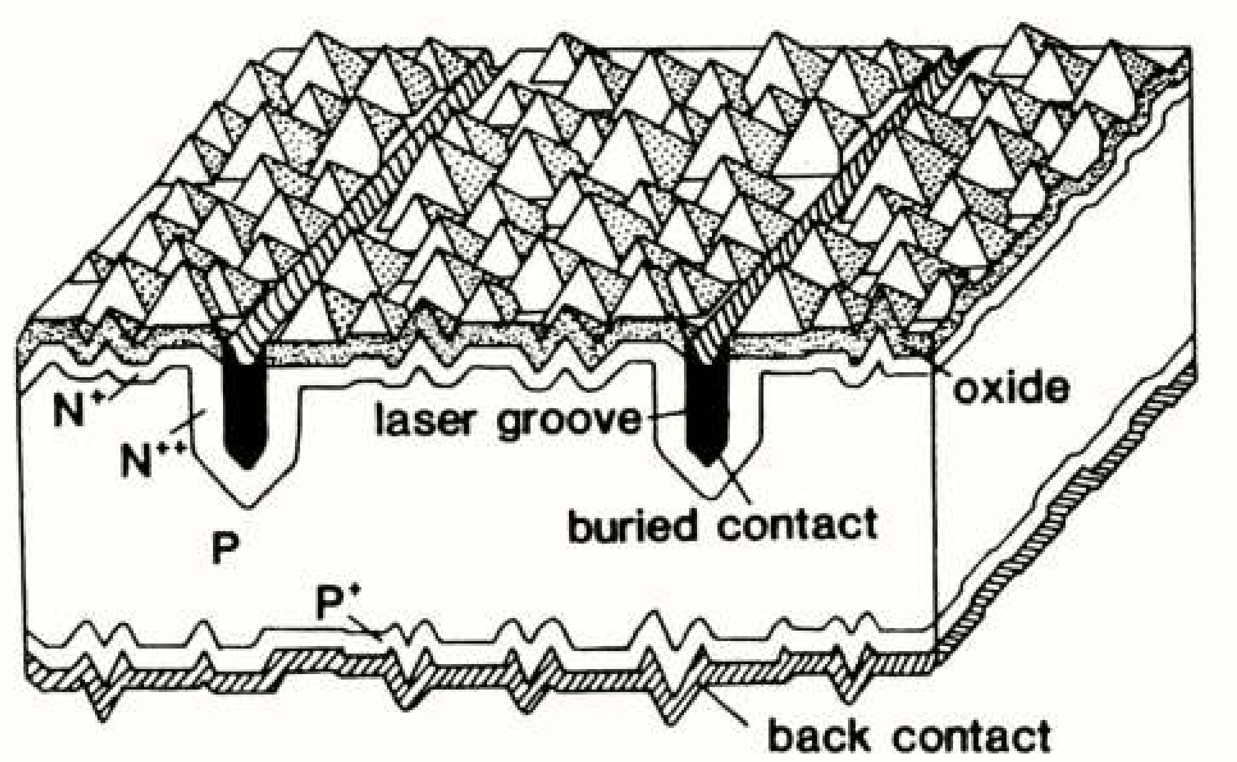


Fig. 4 Zonnecel in silicium met een verbeterde opto-elektrische efficiëntie door het aanbrengen van een textuur en een plasma-geëtst begraven contact ter verlaging van het schaduwoppervlak bij een lage serieweerstand [7].

Innovatieve optische sensoren door toepassing van de mikromechanica

Een zeer veelbelovend sensortype is de glasfiber sensor [8]. Doordat licht als informatiedrager wordt toegepast is dit sensortype te prefereren in toepassingen waar met explosiegevoelige stoffen gewerkt wordt, zoals in de chemische procesindustrie. Een nadeel is de noodzaak voor de uitrichting van een glasfiber ten opzichte van een lichtbron en een detector. Daarnaast is de konventionele optische signaalverwerking zeer omvangrijk ten opzichte van de mikro-elektronica. Mikromechanische technieken kunnen worden toegepast, als aangegeven in Fig. 5, om deze nadelen te ondervangen. Men kan een gleuf in het substraat etsen, welke zeer accuraat is uitgericht ten opzichte van een geïntegreerde golfgeleider en men behoeft de glasfiber slechts in de gleuf te plaatsen om verzekerd te zijn van korrecte uitlijning [9]. De geïntegreerde golfgeleider maakt zeer kompacte optische signaalverwerking mogelijk doordat het elektro-magnetische signaal opge-

sloten is in een dunne golfgeleider. In principe zijn er twee methoden beschikbaar om een geïntegreerde golfgeleider in silicium te fabriceren. Ten eerste is een SiO_2-Si-SiO_2 multilaag mogelijk door implantatie van een hoge doses O_2' waardoor, na een langdurige anneal, een begraven oxidelaag ontstaat. De golfgeleiding vindt plaats in het materiaal met de hoogste refractieindex; het silicium. Silicium vertoont bij een golflengte van 1.3 µm een voldoende lage absorptiecoefficient om practische toepassing mogelijk te maken. Daarnaast kan via een SiO_2-Si_3N_4-SiO_2 multilaag een golfgeleider gefabriceerd worden met golfgeleiding in het nitride [10]. Door nu op goed gedefinieerde laterale posities de toplaag te verwijderen kan lokaal de effectieve refractieindex in het onderliggende deel van de golfgeleider veranderd worden. Op deze wijze is het mogelijk om o.a. een Fresnel lens, als afgebeeld in Fig. 6, te realiseren [11][12]. Er is sprake van een optische reden om de toplaag op bepaalde locaties te verwijderen, zodat de constructie van een geïntegreerde golfgeleider in silicium, volgens de aangegeven definitie, ook tot de mikromechanica gerekend kan worden.

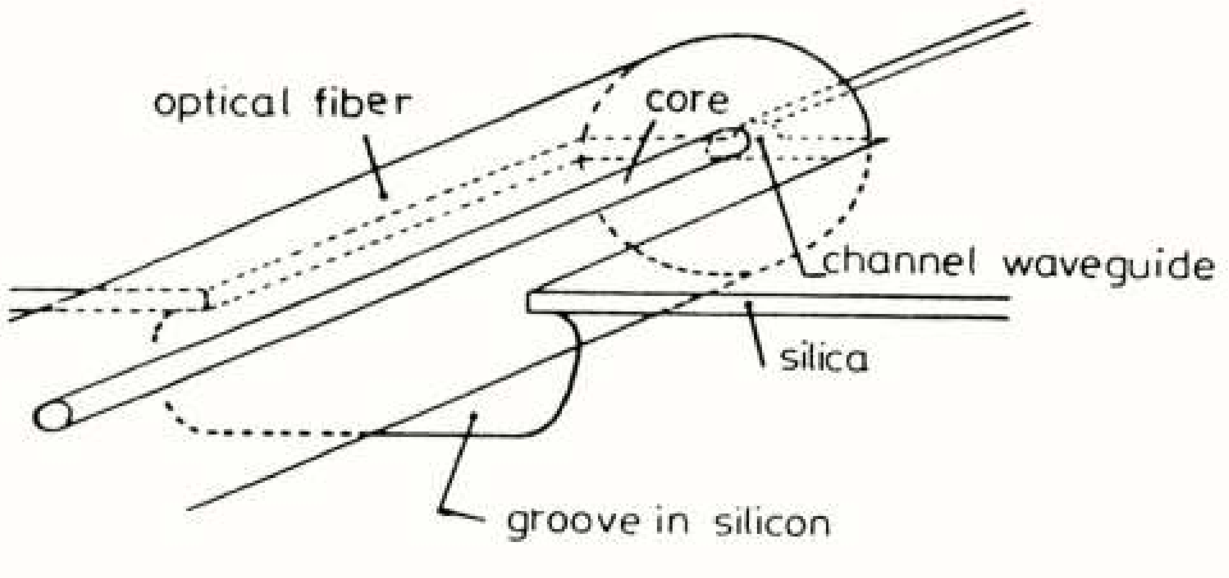


Fig. 5 Uitrichting van een glasfiber met een geïntegreerde silicium golfgeleider door toepassing van een micromachined groef [12].

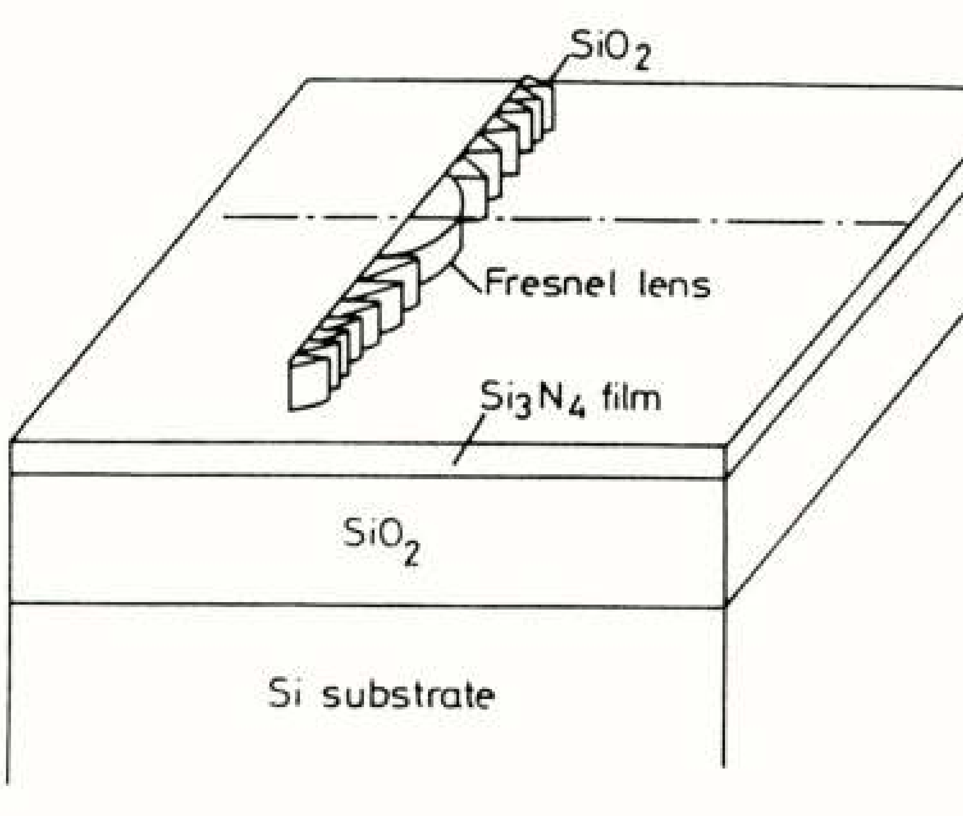


Fig. 6 Fresnel lens in een silicium golfgeleider voor focussering [14].

Micromachining is ook reeds toegepast voor de fabricage van geïntegreerde devices ten behoeve van spectrale analyse. Een optische komponent voor spectrale analyse, welke zich zeer goed leent voor integratie in silicium is de Fabry-Perot interferometer.

Dit type spectrometer is in principe een ruimte tussen twee parallelle spiegels. De afstand tussen de spiegels bedraagt een geheel aantal malen de golflengte, waarvoor de spectrometer zich gedraagt als een optisch banddoorlatend filter. De gewenste spectrale komponent kan daardoor geselecteerd worden door de spiegels op de juiste afstand te plaatsen. Een geïntegreerde Fabry-Perot interferometer is gefabriceerd door toepassing van bulk micromachining op twee silicium wafers [13]. In beide wafers worden dunne membranen uitgeëtst (10 µm), welke via dunne balken zijn opgehangen als aangegeven in Fig. 7. Aan beide membranen is aan de binnenzijde een dunne spiegelende laag zilver opgedampt. Daarnaast zijn aan de binnenzijde van de bulk-micromachined wafers elektroden aangebracht ten behoeve van de elektrostatische sturing van de afstand tussen de spiegels na wafer-to-wafer bonding van de twee wafers. De elektrostatische sturing is zowel van belang voor de programmering van de breedte van deze optische resonerende ruimte als voor het parallel uitlijnen van de beide spiegels. De mate van parallellisme is van groot belang voor de 'kwaliteitsfactor' van het optische banddoorlatende filter; de finesse. Door nu elektroden op 4 plaatsen langs de zijden van de spiegels te plaatsen is het mogelijk om de regeling van de afstand en de parallelle uitrichting van de spiegels gelijktijdig te doen plaatsvinden. Hiertoe wordt in elk van de 4 elektrodenparen de capaciteit gemeten en daarna via een terugkoppellus elektrostatisch op de juiste wijze afgeregeld.

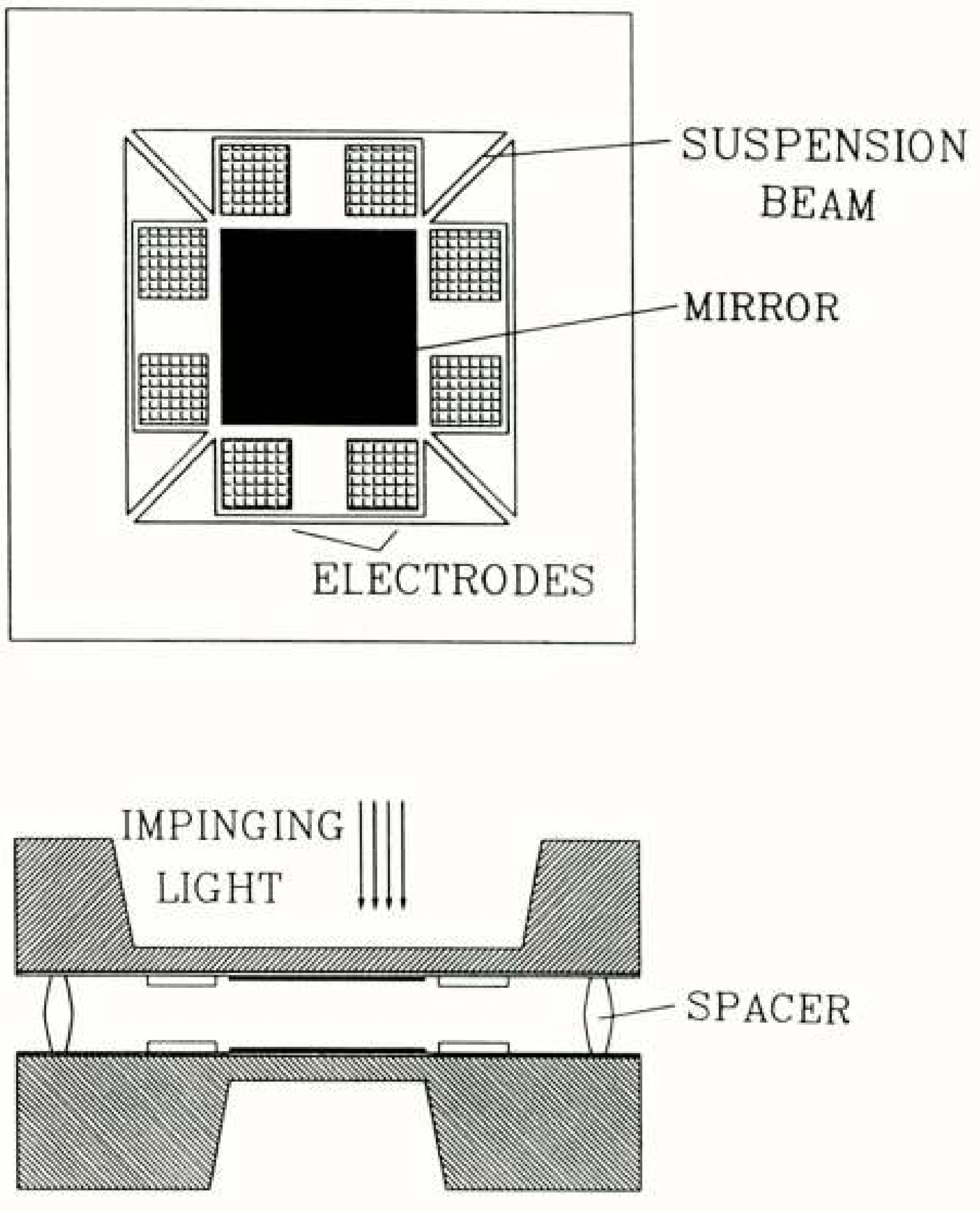


Fig. 7 Geïntegreerde Fabry-Perot interferometer in silicium.

De dikte van de silicium membranen en de volledige absorptie daarin van een groot deel van het zichtbare spectrum beperkt het spectrale werkgebied tot het rode/infrarode deel van het spectrum. De toepassingen zijn daarom vooral te vinden in glasfiber communicatiesystemen.

Mikromechanische vormgevingstechnieken zijn ook toegepast voor de realisatie van een geïntegreerde monochromator voor toepassing in het zichtbare deel van het spectrum. Ook in dit geval wordt bulk-micromachining toegepast op twee wafers. In een van de wafers wordt een kanaal geëtst, terwijl in de tweede wafer de delen van het substraat onder een tralie en een array fotodioden zijn verwijderd [14]. De tralie is samengesteld uit 32 aluminium strips van 2 µm lengte op 2 µm onderlinge afstand en geeft aanleiding tot dispersie van het invallende licht. Het licht dat de tralie passeert, wordt omgezet in een ruimtelijk spectrum en op een helling

geprojecteerd. Deze helling is in de tweede <100> wafer geëtst en de hoek is bepaald door de hoek tussen de <111> en de <100> kristalrichting (54,7 graden). Na reflectie tegen de bodem en de overliggende helling, als aangegeven in Fig. 8, wordt het spectrum geprojecteerd op een array fotodioden, welke zijn geïntegreerd in de eerste wafer. Beide wafers zijn via de wafer-to-wafer bonding methode samengevoegd. Uitlezing van de fotostromen maakt het mogelijk om het spectrum van het invallende licht te bepalen. De meervoudige reflectie tegen de onderste wafer is van belang om een aanvaardbare spectrale resolutie te kunnen realiseren. De detector array is samengesteld uit fotodioden van 2 μm breedte en 2 μm onderlinge tussenruimte. Een verlenging van de optische weglengte maakt het mogelijk om het spectrum over een groot aantal dioden te projecteren. De maximale afmeting van de projectie is bepaald door de lengte over de tweede helling en dus door de waferdikte (525 μm voor een 4" wafer). De bruikbare breedte van het geprojecteerde spectrum wordt verder ingeperkt door uitrichttoleranties. Per saldo is ca 400 μm beschikbaar, waardoor de huidige configuratie geschikt is voor het zichtbare spectrum met een resolutie van ca 2 nm. Een voordeel van deze geïntegreerde monochromator is de scheiding tussen het spiegelend deel en het deel waarin de tralie en de elektronica geïntegreerd is, waardoor een zgn. 'smart sensor' zeer goed te realiseren is.

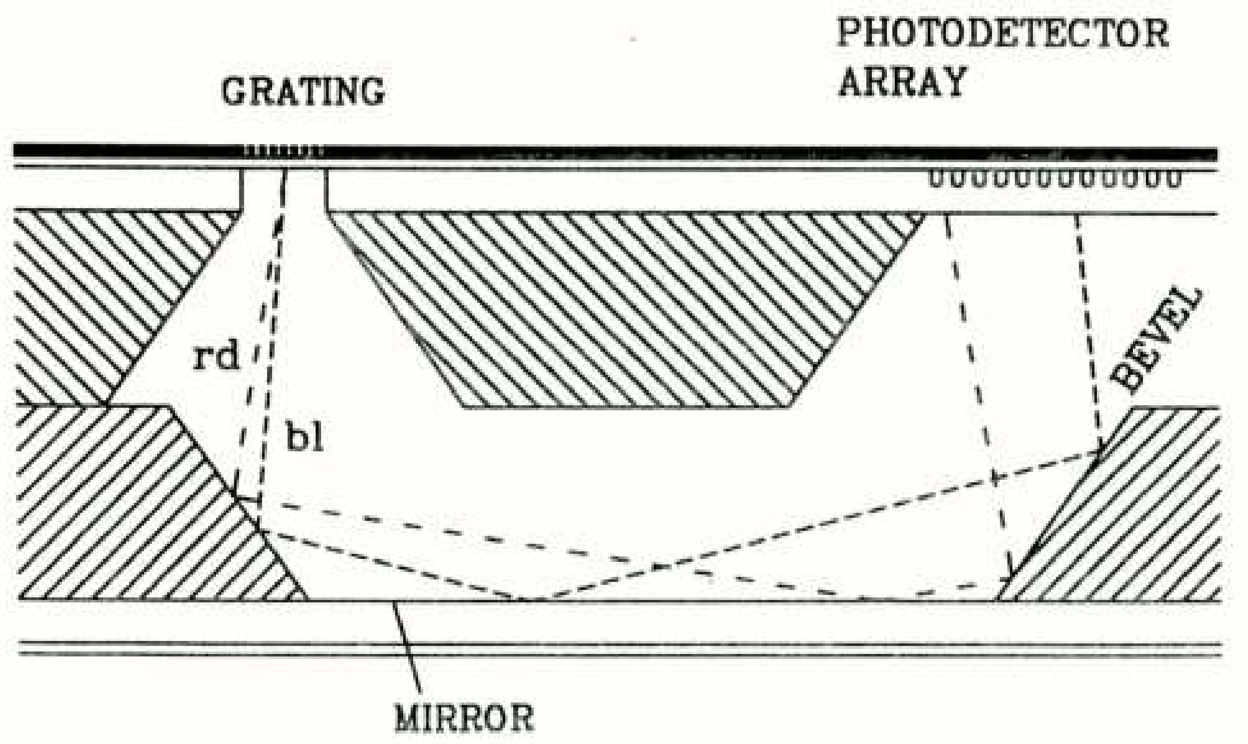


Fig. 8 Structuur van een geïntegreerde monochromator in silicium.

Tot nu toe zijn de konventionele mikromechanische vormgevingstechnieken aan de orde geweest voor zowel de verbetering van konventionele sensoren als de konstructie van innovatieve optische sensoren. Zoals reeds aangegeven in de inleiding, maakt de gegeven definitie het ook mogelijk om een aantal niet-konventionele methoden tot de mikromechanica te rekenen. De eerste is de reeds aangegeven methode voor realistie van diverse optische functies in een silicium golfgeleider door de toplaag op bepaalde plaatsen te verwijderen. Een tweede voorbeeld heeft betrekking op de dimensionering van een meerlaags antireflectie filter.

Niet-konventionele mikromechanische vormgevingstechnieken

Het dimensioneren van een dunne laag voor optimale transmissie in een bepaald deel van het spectrum is van belang bij CCD kamera's. Een array fotodioden is geïntegreerd in een substraat en is bedekt met een dunne laag silicium-oxide en een dunne polysilicium laag ten behoeve van de uitlezing. In principe is het niet nodig om over het polysilicium een top oxide aan te brengen. De transmissie van licht in het zichtbare deel van het spectrum door de oxide-polysilicium-oxide multilaag in het silicium substraat is ten gevolge van interferentie sterk afhankelijk van de diktes van de dunne lagen en de absorptie in het polysilicium [15]. Een komplicatie is de golflengteafhankelijkheid van de absorptiecoëfficiënt in silicium [16]. De transmissie is te berekenen en de resultaten zijn in Fig. 9 aangegeven voor verschillende diktes van de toplaag. De figuur geeft duidelijk aan, dat een toplaag van 100 nm aanleiding geeft tot optimale transmissie. Het aanbrengen van de toplaag komt uitsluitend voort uit een optische noodzaak en sluit dus direct aan op de gegeven definitie van micromachining.

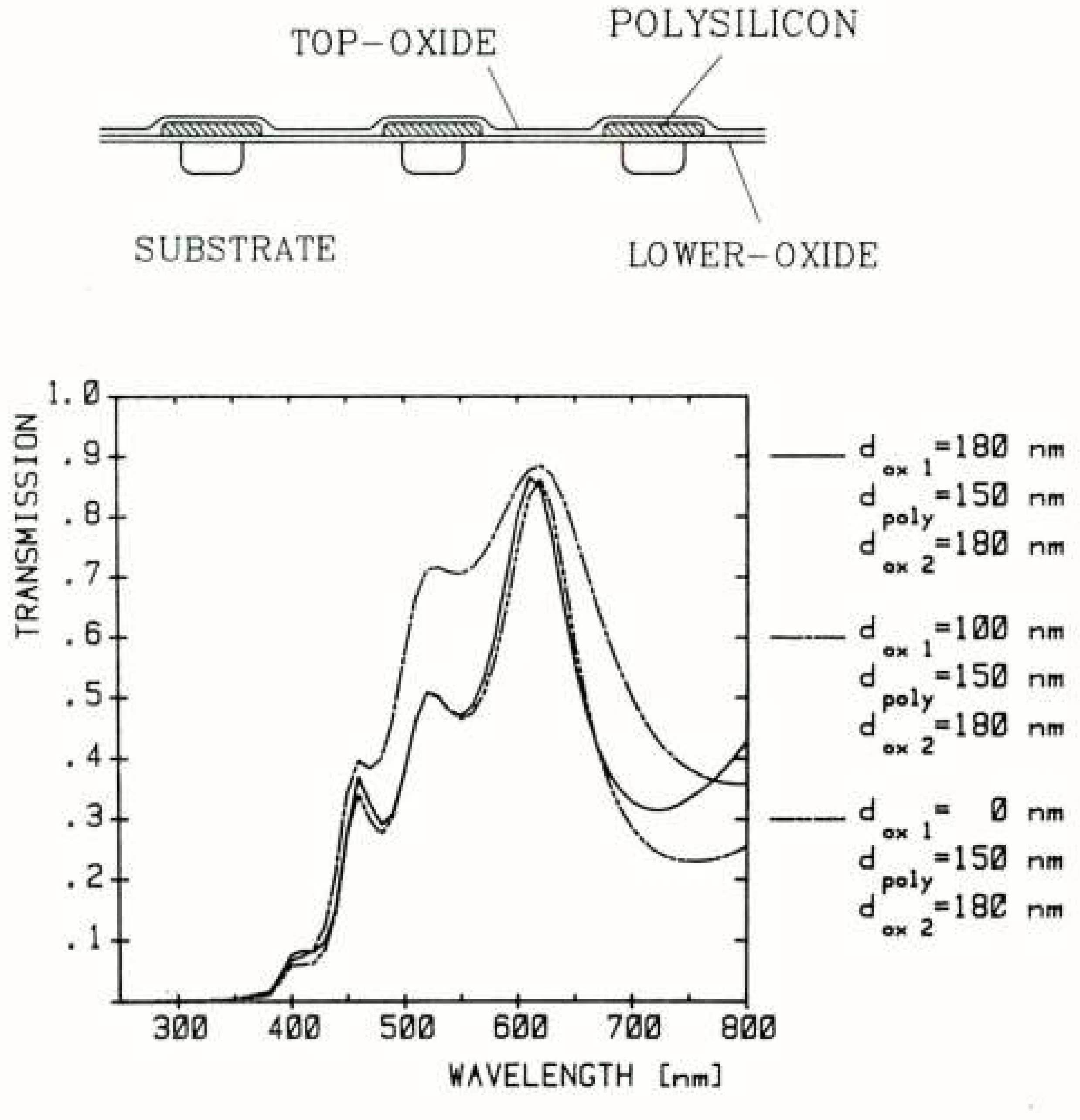


Fig. 9 Transmissie van zichtbaar licht door een siliciumoxide-polysilicium-siliciumoxide multilaag in een silicium substraat met een onderste oxidelaag van 180 nm dikte, een polysiliciumlaag van 150 nm dikte en een oxide toplaag van variabele dikte.

De invloed van een multilaags antireflectiefilter kan uiteraard ook op de komplementaire wijze toegepast worden. De konventionele CCD kleurenkamera is samengesteld uit een tweedimensionaal array van fotodioden met drie typen kleurenfilters in een schaakbordpatroon daarop aangebracht [17]. Inplaats van deze filters is het in principe mogelijk om, door de dimensionering van de oxide, nitride en polysilicium dunne lagen, de transmissie van elk van de drie primaire kleuren afzonderlijk in het onderliggende silicium te programmeren. Een resultaat is aangegeven in Fig. 10. Het blijkt niet goed mogelijk om uitsluitend op basis van dit effect kleurenfiltering met silicium-kompatibele materialen te realiseren.

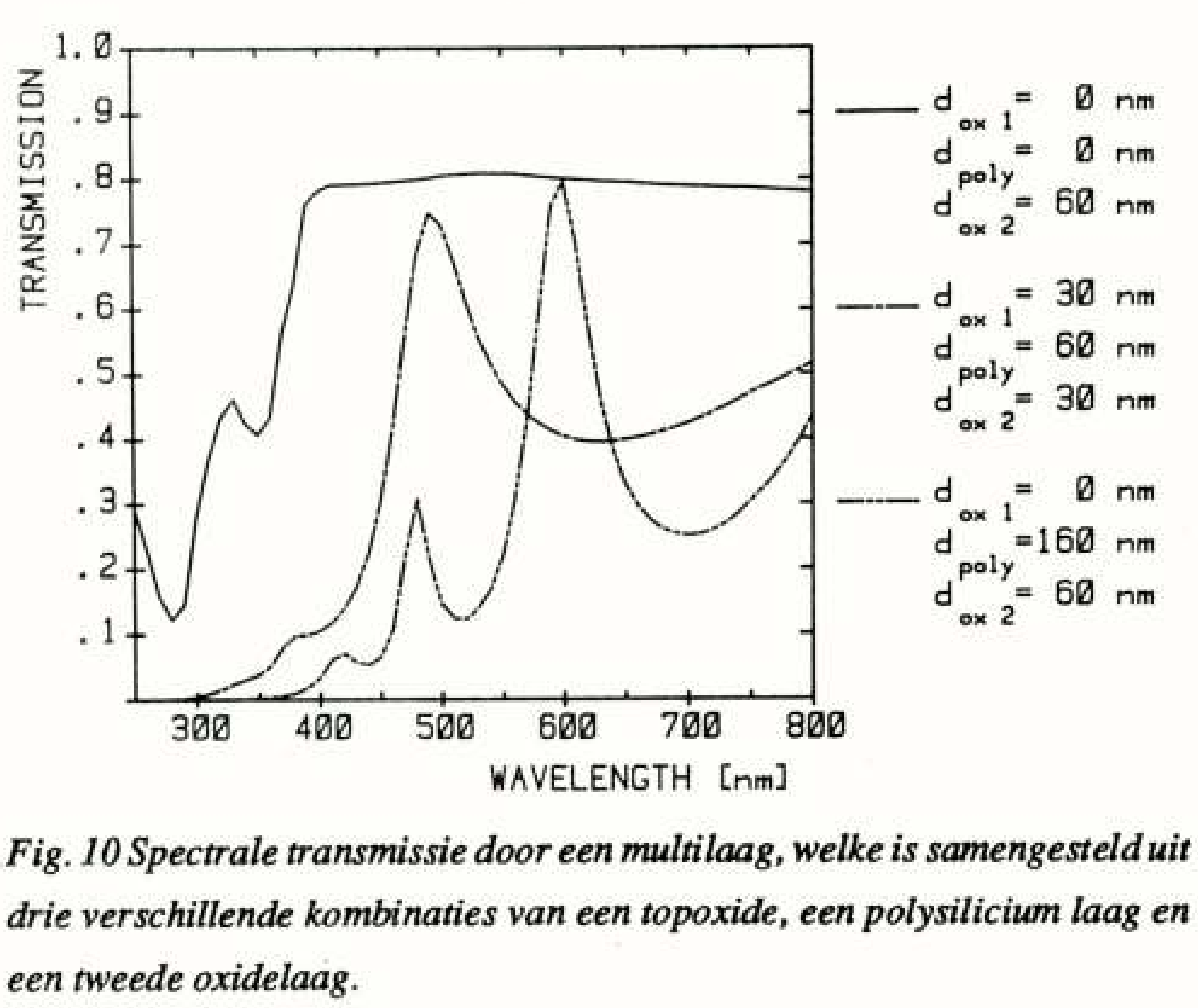


Fig. 10 Spectrale transmissie door een multilaag, welke is samengesteld uit drie verschillende kombinaties van een topoxide, een polysilicium laag en een tweede oxidelaag.

Echter, in kombinatie met de golflengte-afhankelijkheid van de absorptiecoëfficiënt van zichtbaar licht in silicium is een goede kleurselectiviteit mogelijk. Door dioden te fabriceren op verschillende diepten en te bedekken met dunne lagen van verschillende dikte zijn detectoren in silicium te realiseren voor elk van de primaire kleuren.

Conclusies

In dit overzicht is aangegeven wat het belang is van de mikromechanica in optische sensoren. Konventionele mikromechanische vormgevingstechnieken worden veelvuldig toegepast voor zowel de verbetering van de specificatie van reeds bestaande typen van optische sensoren als ook de realisatie van geheel nieuwe typen van optische sensoren. Daarnaast is aangegeven dat het gebied van de mikromechanica breder is dan in het algemeen wordt verondersteld.

Literatuurverwijzingen

[1] S.M. Sze, VLSI Technology, Mc.Graw-Hill, 2nd Edn, 1988.

[2] R.S. Muller, Microdynamics, Sensors and Actuators, A21-A23 (1990), pp.1-8.

[3] A.W. van Herwaarden, D.C. van Duyn, B.W. van Oudheusden and P.M. Sarro, Integrated thermopile sensors, Sensors and Actuators, A21-A23 (1990), pp. 621-630.

[4] O. Christensen, Quantum efficiency of the internal photoelectric effect in silicon and germanium, Journal of applied physics, Vol. 47 No. 2, 1975, pp. 689-695.

[5] H.J. Hovel, Solar cells, in: R.K. Willardson and A.C. Beer, Semiconductors and Semimetals, Vol. 11, Academic Press, 1975.

[6] S.Y. Chiang, B.G. Carbajal and G.F. Wakefield, Improved performance thin solar cells, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-25, 1978, pp.1405-1409.

[7] C.M. Chong, K.E. Davies, S.R. Wenham, M. Gross, C.M. Horwitz and M.A. Green, Plasma-grooved buried contact silicon solar cells, Journal of applied physics, Vol. 69 No. 7, 1991, pp. 4135-4136.

[8] J. Dakin and B. Culshaw, Optical fiber sensors: principles and components, Vol. 1 and 2, Artech House, 1988.

[9] G. Grand, H. Denis and S. Valette, New method for low cost and efficient optical connections between single mode fibers and silica guides, Electronic Letters, Vol. 27 No. 1, 1991, pp. 16-18.

[10] D.G. Hall, Survey of silicon-based integrated optics, IEEE Computer, 1987, pp. 25-32.

[11] S. Valette, A. Morque and P. Mottier, High-performance integrated Fresnel lenses on oxidized silicon substrate, Electronic Letters, Vol. 18 No. 1, 1982, pp. 13-15.

[12] P. Mottier and S. Valette, Integrated Fresnel lens on thermally oxidized silicon substrate, Applied Optics, Vol. 20 No. 9, 1981, pp. 1630-1634.

[13] J.H. Jerman and S.R. Mallinson, A miniature Fabry-Perot interferometer fabricated using silicon micromachining techniques, Proc. IEEE Solid-state Sensor and Actuator Workshop, South Carolina, USA, 6-9 June 1988.

[14] R.F. Wolffenbuttel and T.A. Kwa, Integrated monochromator fabricated in silicon using micromachining techniques, Proc. Transducers 91, San Francisco, CA, USA, 23-27 June 1991, pp.

[15] C. Anagnostopoulos and G. Sadasiv, Transmittance of air/SiO_2/polysilicon/SiO_2/Si structures, IEEE J. of Solid state cicuits, Vol. 10 No. 3, 1975, pp. 177-179.

[16] H.R. Philipp and E.A. Taft, Optical constants of silicon in the region 1 to 10 eV, Phys. Rev., Vol. 120, 1960, pp. 37-38.

[17] K.A. Parulski, Color filters and processing alternatives for one-chip cameras, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-32, 1985, pp. 1381-1389.

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

"GEINTEGREERDE INTELLIGENTE SENSOREN"
of
"MIST DE NEDERLANDSE INDUSTRIE DE AUTOMATISERINGSBOOT?"

Prof. Dr. Ir. J.H. Huijsing en Ir. H.J. Verhoeven
Technische Universiteit Delft, Faculteit der Elektrotechniek,
Vakgroep Elektronische Instrumentatie

Integrated Smart Sensors

The progress in automation of industrial production machines, such as robots, and automation in consumer products, such as cars, kitchen and household machines, has hitherto been constrained by the lack of inexpensive sensor systems.
Large-scale sensor applications can only be made economically feasible if sensors and circuits are combined in micro-electronic chips with standardized digital bus output. This is the concept of integrated smart sensors (ISS).
This paper, firstly, shows the inevitable evolution of sensors into integrated smart sensors. Secondly the industrial relevance of sensors in automated production machines and consumer products is discussed. Thirdly, a feasibility study on the possibility of combining sensors and circuits into single micro-electronic integrated smart sensors is presented.
Though integrated smart sensors with a digital bus output are not yet on the market, it is to be expected that these sensors will become available within the next five years.

I. INTRODUCTIE

De mens heeft altijd getracht zijn vermogens uit te breiden. Hierbij zijn drie ontwikkelingen aan te wijzen:

1. Bij de eerste ontwikkeling heeft de mens zijn lichaamskracht, zijn mechanisch vermogen uitgebreid.
   Eerst met behulp van de kracht van dieren. Later met de kracht van wind en water. Nog later met een stoommachine, een verbrandingsmotor en een elektromotor.
   Deze technische middelen voor mechanisch vermogen geven de mens meer macht zijn omgeving te bewerken en hem ten nutte te maken. Deze mechanisering heeft geleid tot de industriële revolutie.
2. Bij een tweede ontwikkeling breidt de mens zijn intellectuele vermogens uit met behulp van kunstmatig intelligente machines, of computers.
   De computers stellen de mens in staat routinematige intelligentie te automatiseren. Men spreekt ook wel van automatiseren in bredere zin of informatiseren.
   Deze informatisering heeft zo'n grote invloed op het werk van de mens, dat wel van een informatiserings-revolutie gesproken mag worden.
3. Bij de derde ontwikkeling breidt de mens zijn zintuiglijke vermogens uit door middel van sensoren.
   Sensoren zijn de technische evenbeelden van de menselijke en dierlijke zintuigen, zoals het oog, het oor, de tastzin en de reuk. De kunstmatige zintuigen stellen de mens in staat automatische machines te maken, robots, die niet alleen kunnen handelen of denken, maar ook waarnemen. Op grond van deze waarneming controleert de machine of het gestelde doel bereikt wordt, en stuurt zonodig het proces zonder tussenkomst van de mens bij. Men spreekt hier ook wel van automatisering in engere zin. In deze zin zal hier het woord automatisering gebruikt worden.

Deze automatisering, waarbij de machine steeds meer routinematige handelingen van de mens overneemt, zal leiden tot een nog grotere automatiserings-revolutie dan die we tot nu toe gezien hebben. Toekomstige mogelijkheden zijn niet alleen een huishoudrobot of automatisch geleide verkeersstromen, maar in alle bedrijfstakken zal de produktie steeds meer door zelfstandig werkende machines overgenomen worden. Voor de mens blijven dan de meer creatieve en sociale taken over.

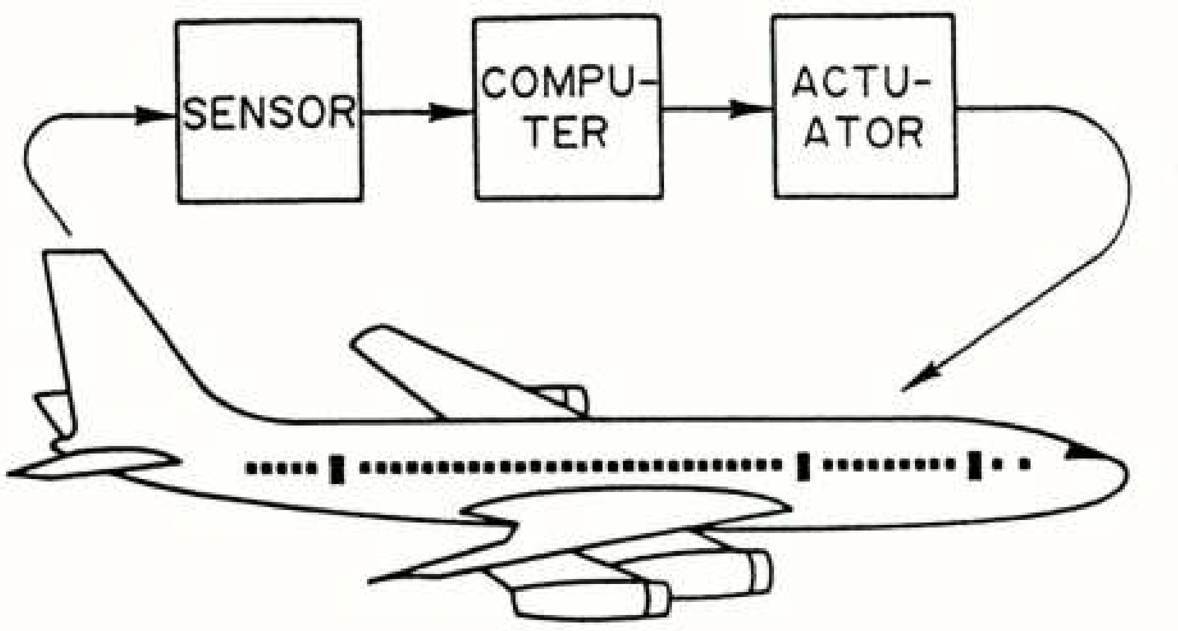


Fig. 1: Vlucht van een vliegtuig, voorbeeld van een automatisch geregeld proces.

Het is interessant om te zien dat een automatisch geregeld proces steeds bestaat uit de drie technische hulpmiddelen van kunstmatig mechanisch vermogen, de actuator, zowel als intellectueel vermogen, de computer en zintuiglijk vermogen, de sensor. Als voorbeeld nemen we de automatisch geregelde vlucht van een vliegtuig (Fig. 1). De actuatoren die in het proces ingrijpen zijn het roer, de kleppen aan de vleugels en de gashandle. De computer, die de vereiste beslissingen neemt, is de automatische piloot. De sensoren, die waarnemen of alles goed gaat, zijn het elektronisch kompas, de hoogtemeter en diverse versnellingsopnemers en drukopnemers.

Wanneer we naar het verloop van prijs/prestatie verhouding kijken in de laatste twintig jaar, dan zien we dat de actuatoren een flinke ontwikkeling doorgemaakt hebben (Fig. 2). Zo is bijvoorbeeld een kleine elektromotor 10 maal zo goedkoop geworden. Op het gebied van de computers is er een weergaloze ontwikkeling geweest. Door verkleining van de afmetingen, kon de prijs per bit meer dan 1000 maal verlaagd worden. De ontwikkeling van sensoren is echter achtergebleven. Naar schatting is de prijs/prestatie verhouding van sensoren slechts gemiddeld met een factor 3 afgenomen.

Dit remt het proces van automatisering. Bovendien loopt de sensorontwikkeling in Nederland nog eens achter in vergelijking met die van de ons omringende landen. Dit tast onze concurrentiepositie aan.

In deze publikatie worden wegen aangeven om de prijs/prestatie verhouding van sensoren te verkleinen, in de hoop dat dit een prikkel is voor de Nederlandse industrie om haar achterstand in te halen.

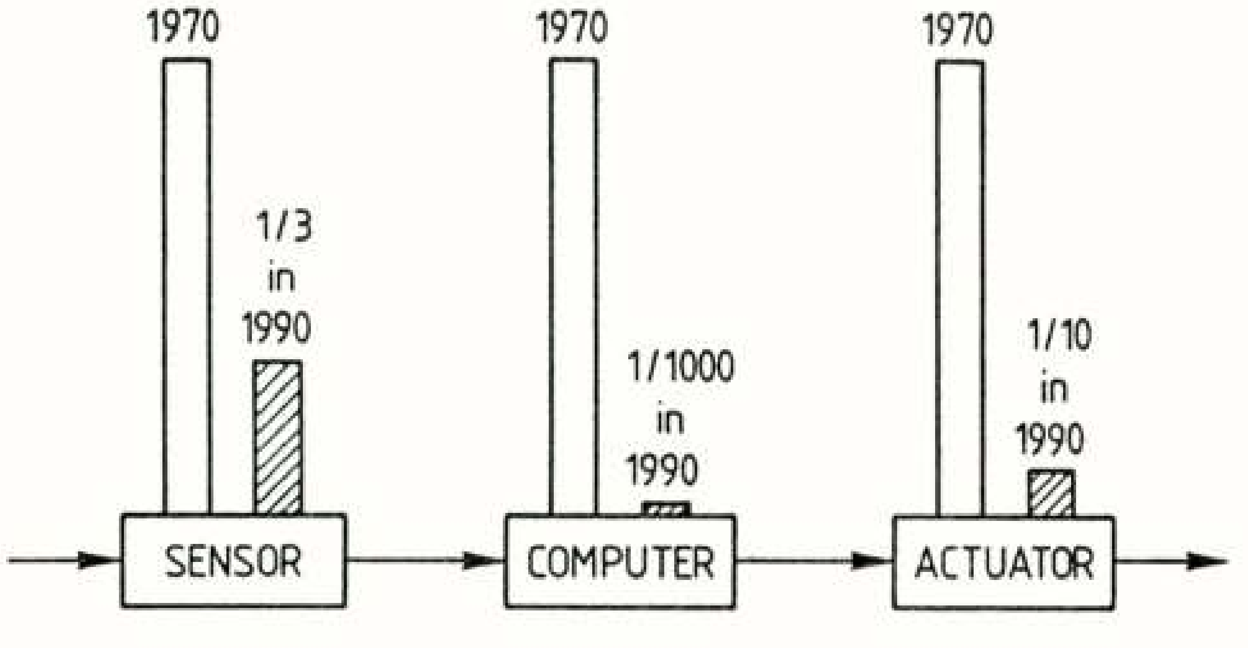


Fig. 2: Prijs/prestatie verhouding van de onderdelen van een automatisch regelsysteem 20 jaar geleden en nu.

II. DEFINITIE

In het tweede deel wordt een definitie van geïntegreerde intelligente sensoren gegeven.

We zullen nu eerst nader bezien wat een sensor is. Daarna bezien we achtereenvolgens een intelligente sensor, een geïntegreerde sensor en tenslotte de geïntegreerde intelligente sensor.

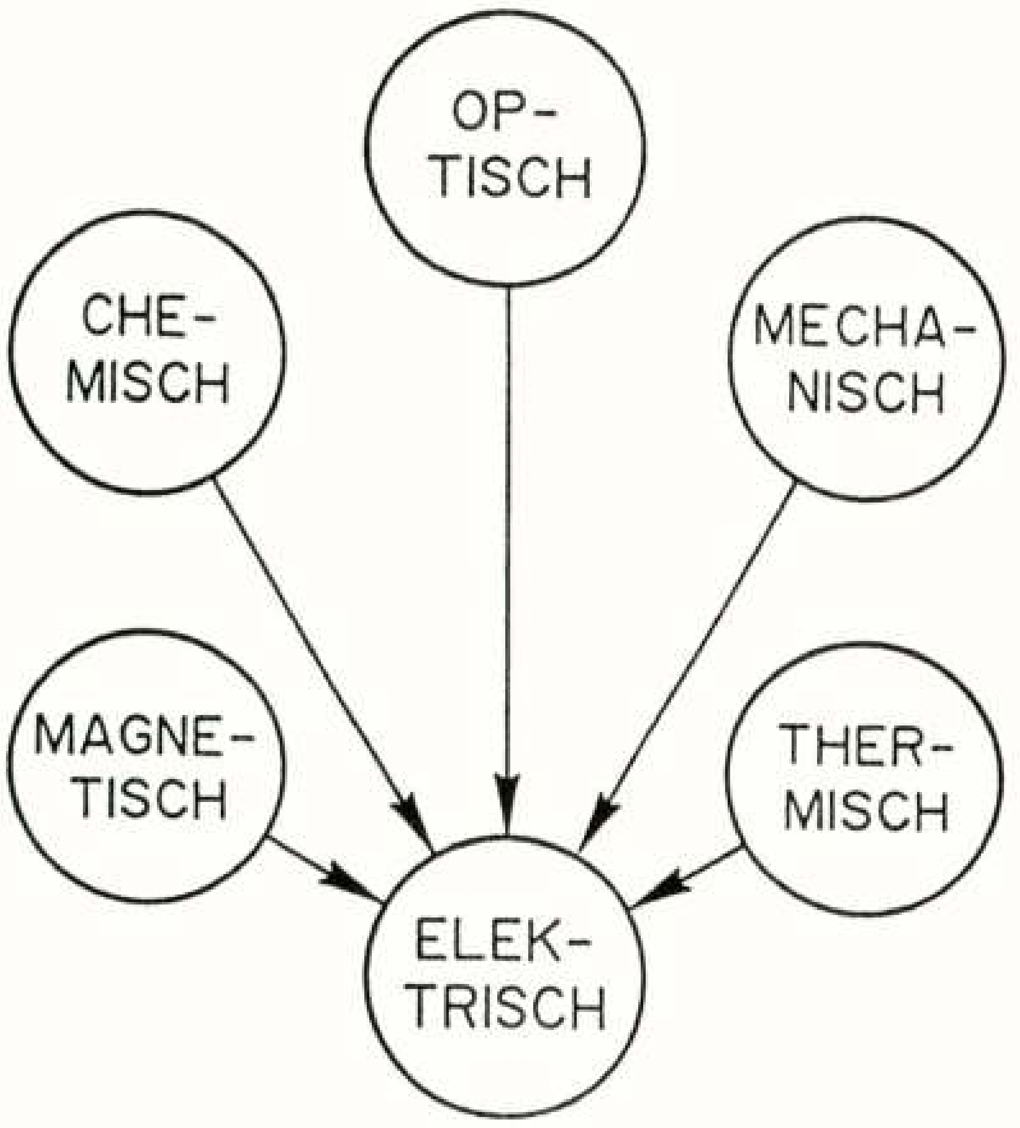


Fig. 3: Sensoren produceren een afbeelding van informatie uit zes energiedomeinen naar het elektrische domein.

Sensoren

Sensoren produceren een afbeelding van informatie vanuit zes energiedomeinen naar het elektrische domein. Er bestaan in totaal zes domeinen: optisch, mechanisch, thermisch, elektrisch, magnetisch en chemisch (Fig. 3).

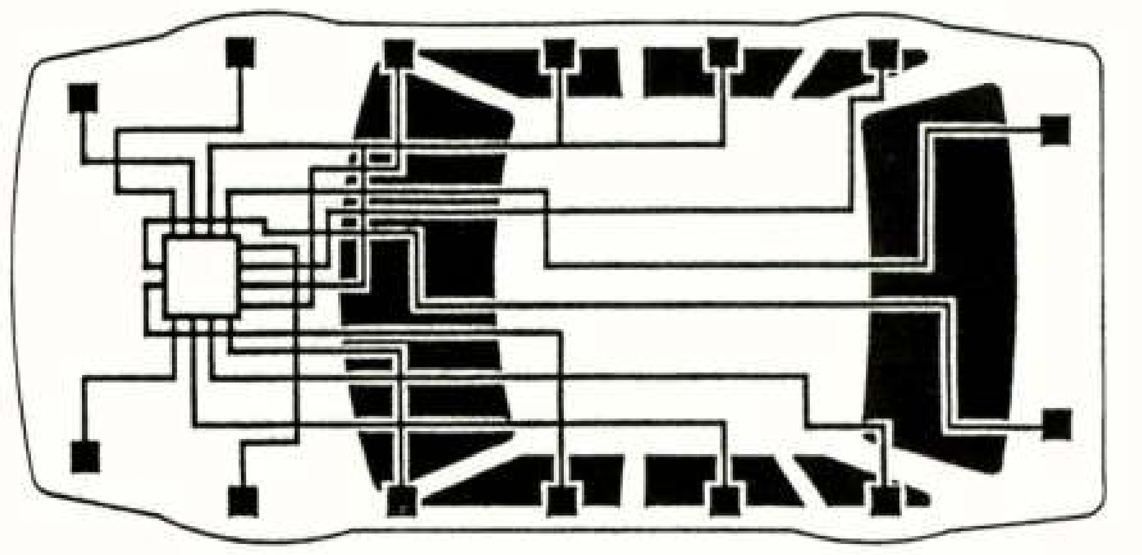


Fig. 4: Conventionele sensoren in een automobiel in ster verbonden met de centrale computer.

Moderne geautomatiseerde processen behoeven een groot aantal sensoren.

Een moderne auto heeft bijvoorbeeld al zo'n 10 sensoren om de automotor schoon en zuinig te laten lopen, waaronder diverse voor temperatuur, gasstroming, gasdruk en chemische gassensoren, en daarnaast nog eens 10 sensoren voor allerlei andere functies, zoals het antiblokkeer remsysteem. Iedere sensor heeft zijn eigen elektrische aansluitschema met specifieke eisen, waardoor het geheel ingewikkeld wordt en de centrale computer te veel diverse typen aansluitingen krijgt om nog betrouwbaar te functioneren. Bovendien leidt dit tot dikke kabeltrossen (Fig. 5). Bedenken wij verder, dat volgens schattingen een auto over vijf jaar al 100 sensoren zal hebben, dan is het duidelijk, dat een conventioneel sensorsysteem niet meer toereikend is.

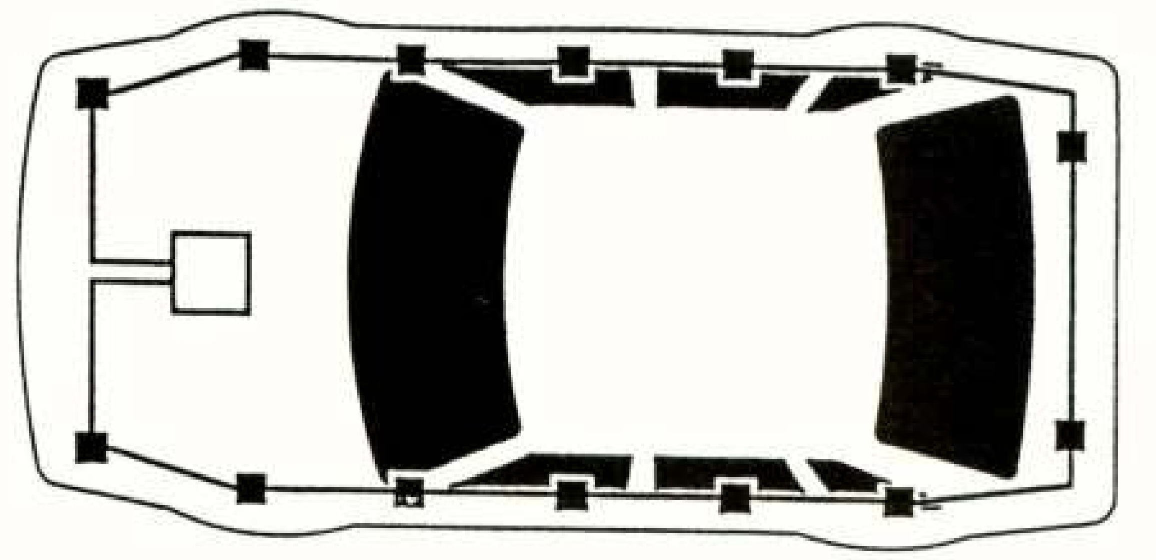


Fig. 5: Intelligente sensoren in een automobiel verbonden met een standaard digitale busverbinding.

Intelligente Sensoren

Voor het geschetste probleem biedt het concept van de intelligente sensor een oplossing. Bij iedere sensor wordt nu een elektronische verwerkingsunit aangebracht (Fig. 6). Deze zet de sensor-informatie om in een gestandaardiseerd uitgangssignaal dat past op een elektrisch communicatie-kanaal, de digitale bus, die langs alle sensoren gaat. Voor een auto is dit het Controller Area Network, of de CAN-bus.

De aansluiting van de vele sensoren op de centrale computer van een auto wordt daardoor een stuk eenvoudiger.

Ook vervanging van onderdelen is nu eenvoudiger geworden vanwege de standaardkoppeling voor alle sensoren.

Geïntegreerde Sensoren

Een dergelijk systeem zou echter voor een consumentenprodukt als een auto veel te duur zijn. Zowel de sensoren zelf, als de print met elektronische componenten, zijn te duur. Er moet dus gezocht worden naar goedkope produktiemethoden voor in massa gefabriceerde intelligente sensoren.

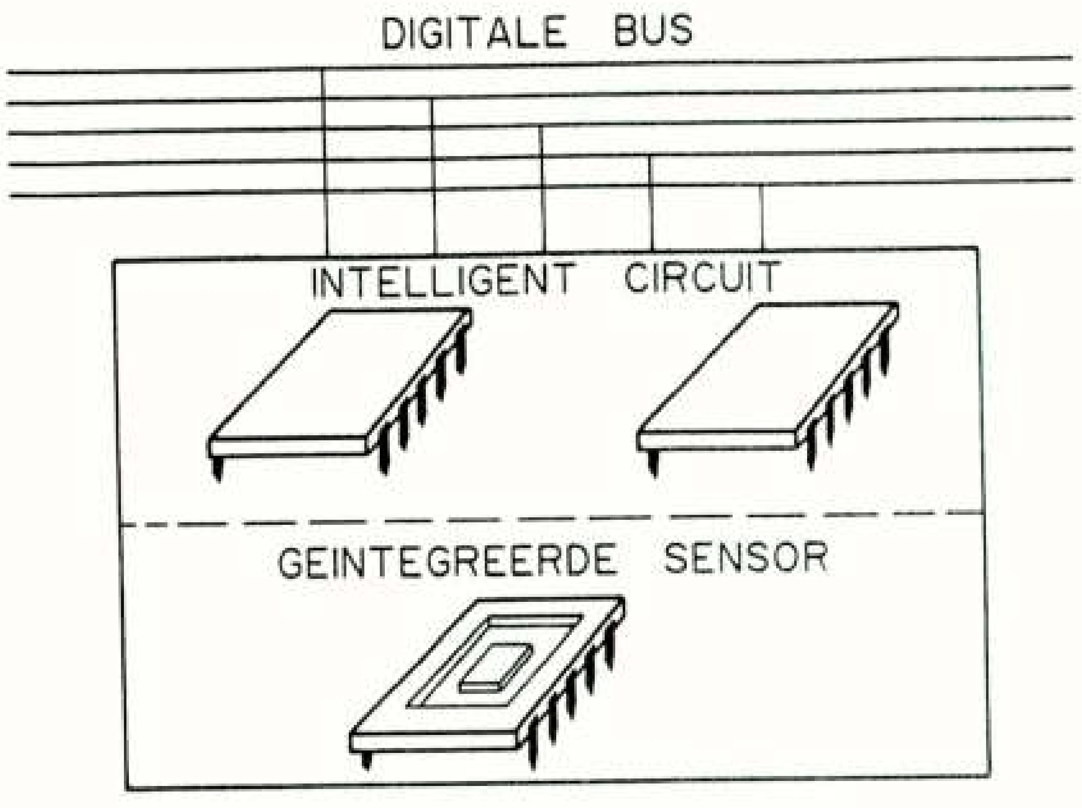


Fig. 6: Geïntegreerde sensor met intelligent circuit op printplaat.

Dit is alleen mogelijk indien de sensoren geïntegreerd kunnen worden in dezelfde micro-elektronische geïntegreerde-circuit technologie als waarin de kunstmatige intelligentie, de computer, gemaakt wordt en waarin zo'n sterke kostenreductie behaald kon worden (Fig. 6). Vele typen geïntegreerde sensoren zijn reeds ontwikkeld, die geschikt zijn voor massafabricage in micro-elektronische geïntegreerde-circuit technologie.

Geïntegreerde Intelligente Sensoren

Echter, nog steeds is er een aparte print nodig voor de elektronica. De prijs van het geheel is nog niet zo laag, dat massaal sensoren in consumentenprodukten kunnen worden toegepast.

Dus is er een laatste stap nodig:

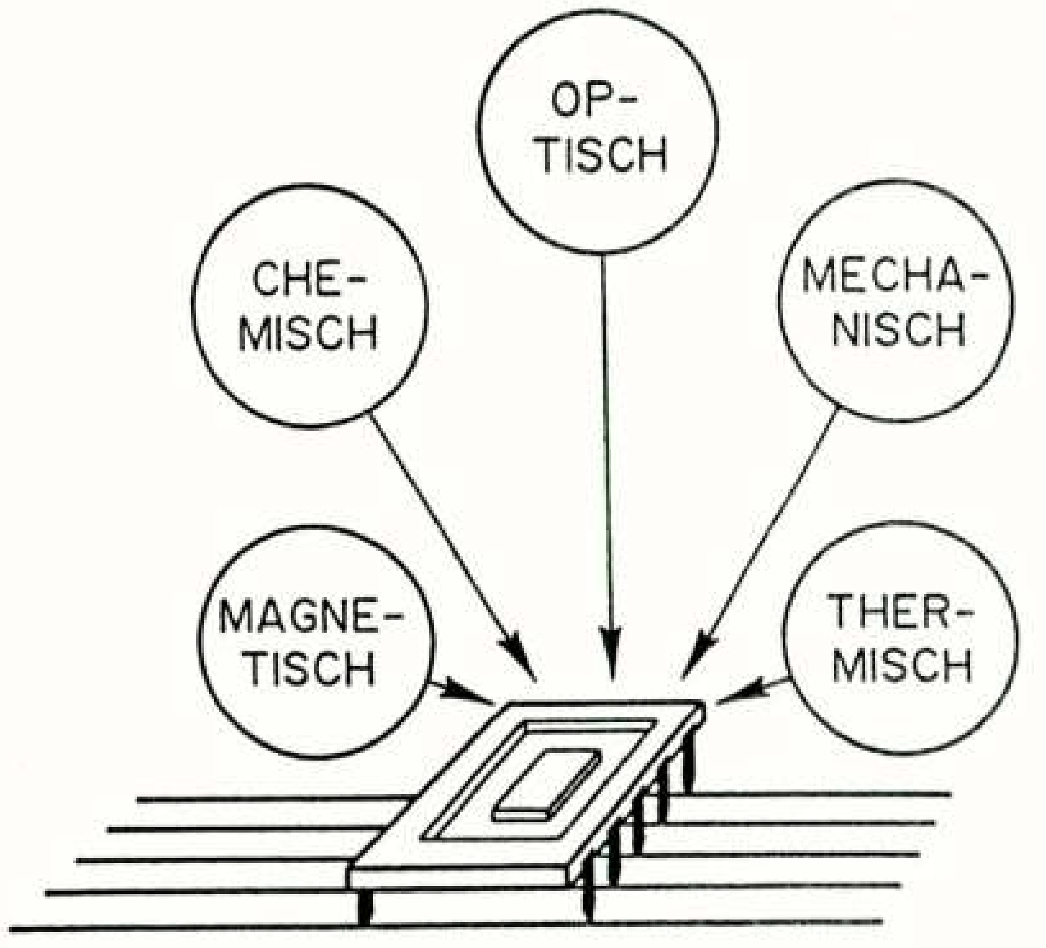


Fig. 7: Geïntegreerde Intelligente Sensor zonder externe componenten, aangesloten op een digitale bus.

De integratie van sensor en intelligentie op één chip zonder externe hulpcomponenten (Fig. 7). Dit is de geïntegreerde intelligente sensor. Vele van deze sensoren kunnen als feestverlichtingslampjes op één kabel geprikt worden. Zo ontstaat een eenvoudig en goedkoop data-acquisitie systeem dat vele hoogwaardige meetgegevens kan verzamelen.

In de volgende twee delen van deze publikatie wordt ingaan op het industrieel belang en de technische realisatie van geïntegreerde intelligente sensoren.

III. INDUSTRIEEL BELANG

Geïntegreerde intelligente sensoren hebben een groot industrieel belang, in de eerste plaats voor de automatisering van industriële produktiemachines, en in de tweede plaats voor automatisering van consumentenprodukten.

Tabel 1: AUTOMATISERING
INDUSTRIELE PRODUCTIEMACHINES

chemie	voertuigen
metaal	vaartuigen
textiel	vliegtuigen
voeding	verkeer
bouw	milieu
landbouw	gezondheid
(glas-) tuinbouw	beveiliging
veeteelt	

Bezien we de tabel (Tabel 1) van industriële produktiemachines, dan merken we dat in elke tak van industrie automatisering van de produktiemachines noodzakelijk is. Of het nu de chemie is, of de metaal, de textiel, de voeding, of de bouw, ze kunnen niet zonder. Dit geldt ook voor de landbouw, de tuinbouw (in het bijzonder de glastuinbouw) en de veeteelt. In voertuigen, vaartuigen, vliegtuigen, verkeer, milieu, gezondheid en beveiliging; overal zijn automatisch geregelde processen nodig.

Sensoren zijn dus noodzakelijk in al deze gebieden. Intelligente sensoren maken een systematische toepassing mogelijk. Geïntegreerde intelligente sensoren maken de toepassing economisch aantrekkelijk.

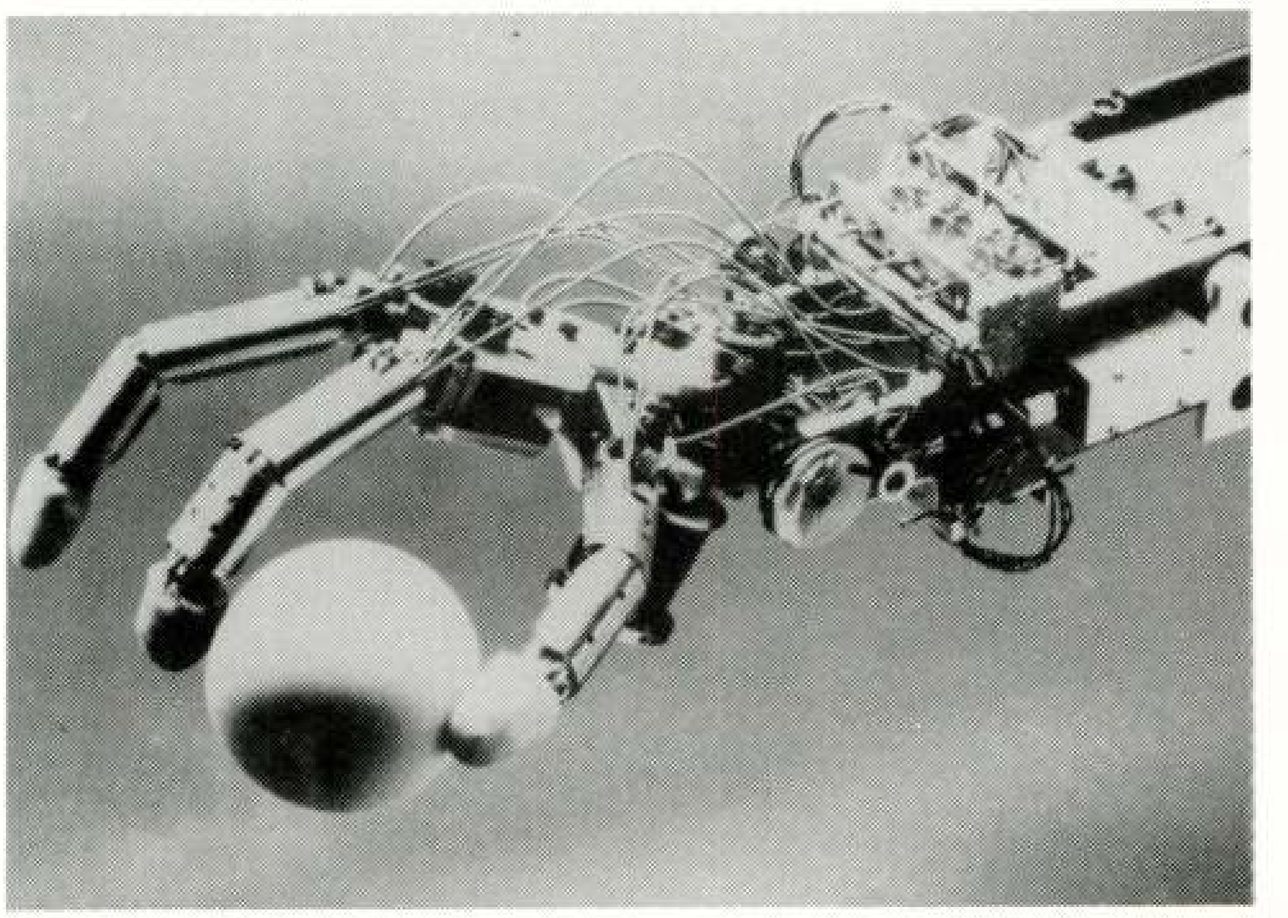


Fig. 8: Tactiele sensoren op de vingertoppen van een robothand.

Er zijn echter ook industriële toepassingen waar integratie niet alleen aantrekkelijk is, maar ook noodzakelijk, bijvoorbeeld vanwege de beperkte ruimte die beschikbaar is voor de sensoren en de bekabeling daarvan.

Zo is het niet mogelijk alle elementen van de tactiele sensoren op de vingertoppen van een robothand (Fig. 8) apart met draden uit te lezen. Ditzelfde geldt in nog sterkere mate voor een CCD videocamera met een half miljoen lichtsensoren. In de veehouderij wordt gewerkt aan een telemetrische capsule die onder de huid van varkens of koeien geïmplanteerd kan worden ter identificatie, meting van de lichaamstemperatuur en andere biologische functies. Vanwege deze specifieke eisen zijn dus ook in sommige industriële toepassingen geïntegreerde intelligente sensoren noodzakelijk.

De belangrijkste drijfveer voor de ontwikkeling van geïntegreerde intelligente sensoren is echter de automatisering van consumentenprodukten.

Tabel 2: AUTOMATISERING CONSUMENTEN PRODUKTEN

auto	wasmachine
foto	vaatwasser
video	oven
audio	stofzuiger
fax	huis
speelgoed	
smart card	

In de tabel (Tabel 2) wordt een aantal consumentenprodukten genoemd waarbij automatisering van functies essentieel is. De auto is daarvan een belangrijk voorbeeld, zoals al eerder aangetoond is. Maar ook de fotocamera, video en audio apparatuur, de facsimile, speelgoed en de smart card vragen om toepassing van vele goedkope sensoren, dus: geïntegreerde intelligente sensoren.

Vele soorten automatisch geregelde functies dringen ook door in huishoudelijke apparaten, zoals wasmachines, vaatwassers, ovens, stofzuigers en in het huis zelf. Een moderne wasmachine bijvoorbeeld heeft nu al een microcomputer en 5 sensoren.

In de toekomst zullen nog slechts die apparaten verkocht worden die eenvoudig te bedienen zijn voor de mens, dat wil zeggen dat zoveel mogelijk functies automatisch geregeld zullen worden.

Indien de Nederlandse industrie dit soort automatisch werkende apparaten wil produceren, en niet alleen assembleren of importeren uit Japan, dan zal zij moeten werken aan geïntegreerde intelligente sensoren.

Stelling

Daarom kan gesteld worden dat de industriële activiteit op het gebied van sensoren op zich een sensor is voor toekomstige industrialisatie.

Het is de vraag of de Nederlandse industrie voldoende actief is op het sensorgebied.

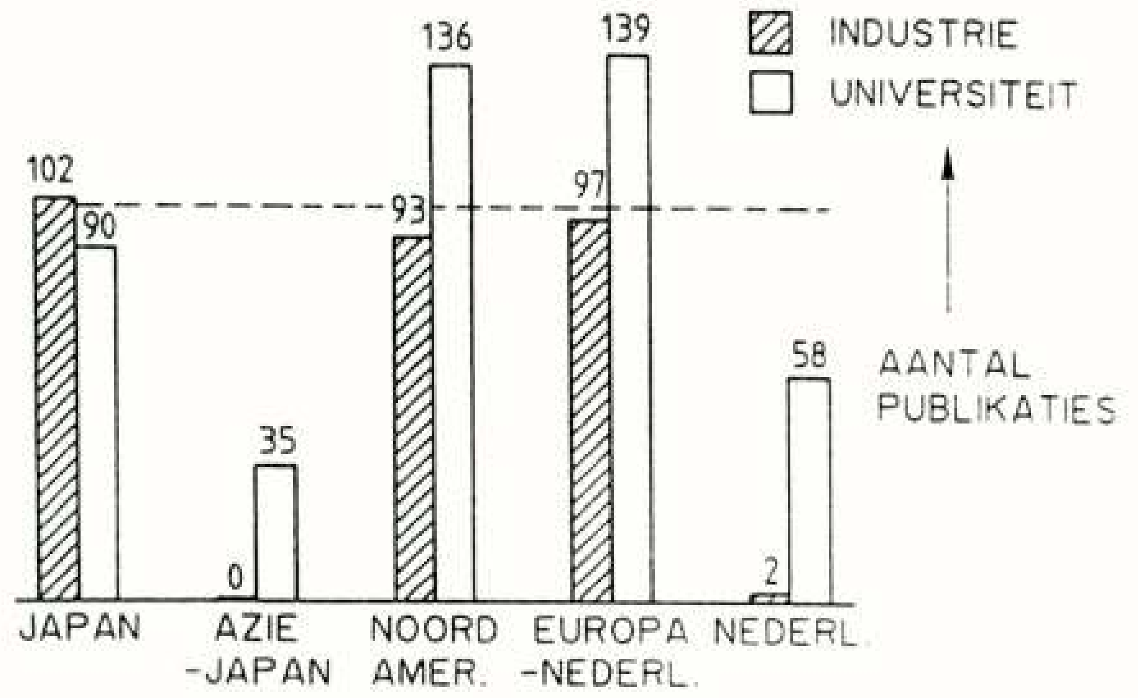


Fig. 9: Aantal publikaties van industrie en universiteit op de International Solid-State Transducers Conference in 1985 USA, 1987 Japan, 1989 Europa.

Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn de publikaties geteld van industrie en universiteit op drie grote internationale sensorconferenties: De International Solid-State Transducer Conference in 1985 in de Verenigde Staten, in 1987 Japan, en in 1989 Europa (Fig. 9).

We zien dat Japan, de Verenigde Staten en Europa een gezonde balans hebben tussen industrie en universiteit. Japan heeft de meeste industriële activiteit met 102 publikaties. Wordt de balans van Nederland daarmee vergeleken, dan zien we een scheef beeld. Nederland heeft slechts twee industriële publikaties. Alleen de balans van ontwikkelingslanden in Azië zonder Japan vertoont een nog schever beeld met nul publikaties uit de industrie.

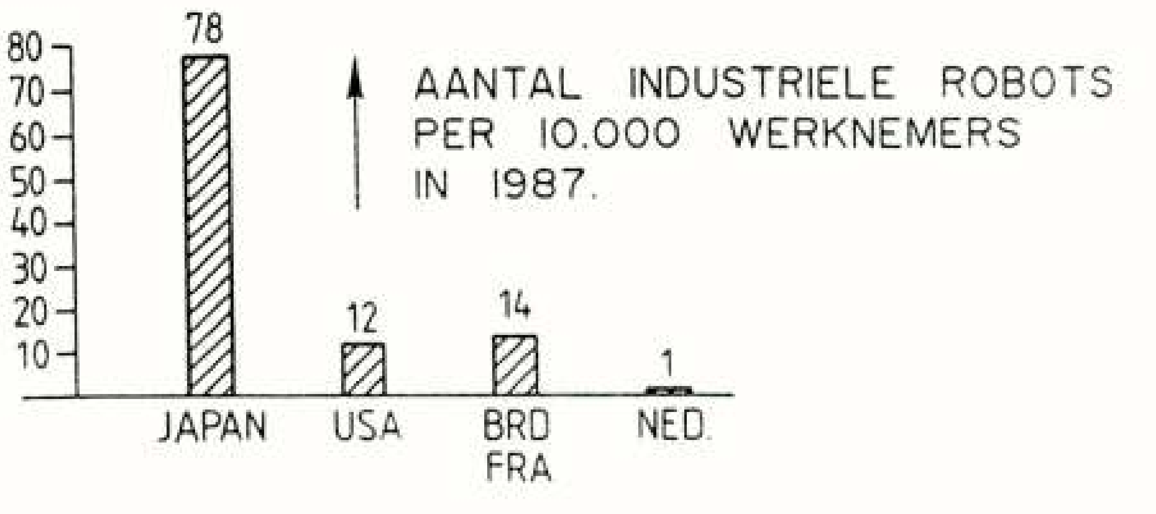


Fig. 10: Aantal industriële robots per 10.000 werknemers in Japan, USA, Europa en Nederland 1987.

Vele andere cijfers bevestigen dit patroon. Een ander voorbeeld is de telling van het aantal industriële robots in 1987 per 10.000 werknemers (Fig. 10). Japan heeft er 78, Amerika 12, Frankrijk en Duitsland 14, Nederland slechts 1.

Geconcludeerd moet dus worden dat de Nederlandse industrie een flinke achterstand heeft. Als deze ontwikkeling zo door gaat, mist de Nederlandse industrie helaas de automatiseringsboot. Ten eerste vanwege de achterstand in automatisering van produktiemachines. Ten tweede vanwege onvoldoende geautomatiseerde functies in consumentenprodukten. Beide aspecten verzwakken de Nederlandse concurrentiepositie en hangen samen met een zwakke sensorindustrie. In een Europa met open grenzen na 1992 zal dit zich zeker wreken.

IV. REALISATIE

Nu zal een inventarisatie gegeven worden van de realisatiemogelijkheden van geïntegreerde intelligente sensoren.

Vier vragen zijn van belang:

1. Welke sensoren kunnen in een standaard IC proces gemaakt worden?
2. Welke schakelingen zijn gewenst en mogelijk?
3. Welke tussenoplossingen worden door haalbaarheid en opbrengst gedicteerd?
4. Welke consequenties heeft dit voor het onderwijs en onderzoek?

Sensoren in een standaard IC proces

Bezien we eerst welke sensoren er in een standaard integratieproces gemaakt kunnen worden (Tabel 3).

Voor de zes energiedomeinen zijn er sterk wisselende beperkingen.

Bij de optische sensoren vormen diodestructuren de basis voor het meten van licht, kleur en straling. Speciale position-sensitive devices zijn geschikt voor het meten van mechanische verplaatsing. Charge-coupled devices vindt men in CCD videocamera's. Foto-transistors zijn zeer gevoelig voor lage lichtsterkten. In al deze gevallen is de enige restrictie dat de IC behuizing een licht- of stralingsdoorlatend venster bezit. Dit type sensor kan zonder beperking in een standaardproces gemaakt worden.

Bij de mechanische sensoren liggen deze beginvoorwaarden minder gunstig. Weliswaar kunnen in het standaardproces piëzo-gevoelige weer-

Tabel 3a: SENSOREN IN EEN STANDAARD IC PROCES

1. OPTISCHE SENSOR	BEPERKINGEN
fotodiodes	
licht	behuizing
kleur	"
straling	"
position sensitive device	"
charge-coupled device	"
fototransistor	"

2. MECHANISCHE SENSOR	BEPERKINGEN
piëzo-weerstand	
druk	micro-mechanica
versnelling	"
capaciteit	
tast	behuizing
verplaatsing	"

3. THERMISCHE SENSOR	BEPERKINGEN
bipolaire transistor	
temperatuur	dissipatie
thermokoppel	
stroming	behuizing
infrarood	micro-mechanica

standen gemaakt worden. Maar om hiervan een goede drukmeter of versnellingsopnemer te maken, dient de chip micro-mechanisch bewerkt te worden tot een dun membraan. Op dit moment is zo'n bewerking nog kostbaar. Het is evenwel goed mogelijk dat dit in de toekomst tot de standaarduitrusting van een IC proces gaat behoren, onder de druk van de vraag naar geïntegreerde sensoren.
Voor de capacitieve verplaatsings- en tastsensoren behoeft in principe slechts de behuizing aangepast te worden, maar ook hier is een micro-mechanische bewerking vaak gewenst.

Bij de thermische sensoren ligt de zaak weer eenvoudiger. Een bipolaire transistor kan zeer goed de absolute temperatuur meten en deze temperatuur dringt gemakkelijk door de behuizing heen. Echter mag de eigen dissipatie van de chip niet te groot zijn, omdat anders de te meten temperatuur verstoord wordt. Met thermokoppels op de chip is het goed mogelijk zeer kleine temperatuurverschillen op de chip te meten. Met een aanpassing van de behuizing zijn hiermee goede stromingssensoren te maken voor gassen en vloeistoffen. De gevoeligheid van infra-rood sensoren en de responsietijd kan sterk verbeterd worden door een micromechanische bewerking van de chip.

Tabel 3b: SENSOREN IN EEN STANDAARD IC PROCES

4. ELEKTRISCHE SENSOR	BEPERKINGEN
bipolaire transistor	
bandgap potentiaal	
elektrode	
potentiaal	behuizing

5. MAGNETISCHE SENSOR	BEPERKINGEN
Hall-plaat	
schakelaar	
toerenteller	
spinning Hall-plaat	

6. CHEMISCHE SENSOR	BEPERKINGEN
chemo-capaciteit	
vocht	speciaal proces
ISFET	
pH	"
SAW	
CO	"

Elektrische sensoren zijn ook interessant, hoewel we hierbij binnen het elektrische domein blijven. De band-gap spanning van silicium kan bijvoorbeeld met bipolaire transistoren gemeten worden. Deze potentiaal levert een goede spanningsreferentie op de chip. Daarvoor is geen extra processtap nodig.
Gebruiken we de chip om externe potentialen te meten, bijvoorbeeld als een micro-elektrode voor biologische potentialen, dan moet de behuizing aangepast worden en moeten speciale geleiders op de chip aangebracht worden.

Magnetische sensoren zijn eenvoudig toe te passen als contactloze schakelaars, afstandsdetectoren, of toerentellers. Onderzoek is ook gaande om de Hall-plaat zo gevoelig mogelijk te maken dat het aardmagnetisch veld gemeten kan worden, zodat een micro-elektronisch kompas ontstaat. In al deze gevallen is geen extra processtap nodig, want magneetvelden dringen gemakkelijk door de behuizing van de chip heen.

De chemische sensoren, tenslotte, zijn de moeilijkste om in geïntegreerde vorm te maken. Immers, de behuizing van een chip is juist bedoeld om alle invloeden van vocht en chemische stoffen buiten de chip te houden, zodat de eigenschappen van de chip niet degraderen. En nu ineens willen we de chip bloot stellen aan vocht, de zuurgraad van een vloeistof, of het koolmonoxide in uitlaatgassen van auto's.
Toch zijn ook hier grote vorderingen gemaakt wanneer we kijken naar het werk aan capacitieve vochtsensoren, ionen-gevoelige field effect transistoren (ISFET) en surface-acoustic-wave (SAW) sensoren in combinatie met een chemisch interface.

Hoewel dit overzicht slechts enkele veel voorkomende typen geïntegreerde sensoren bevat, toont het aan dat we optimistisch mogen zijn voor wat betreft de realisatie van geïntegreerde intelligente sensoren.

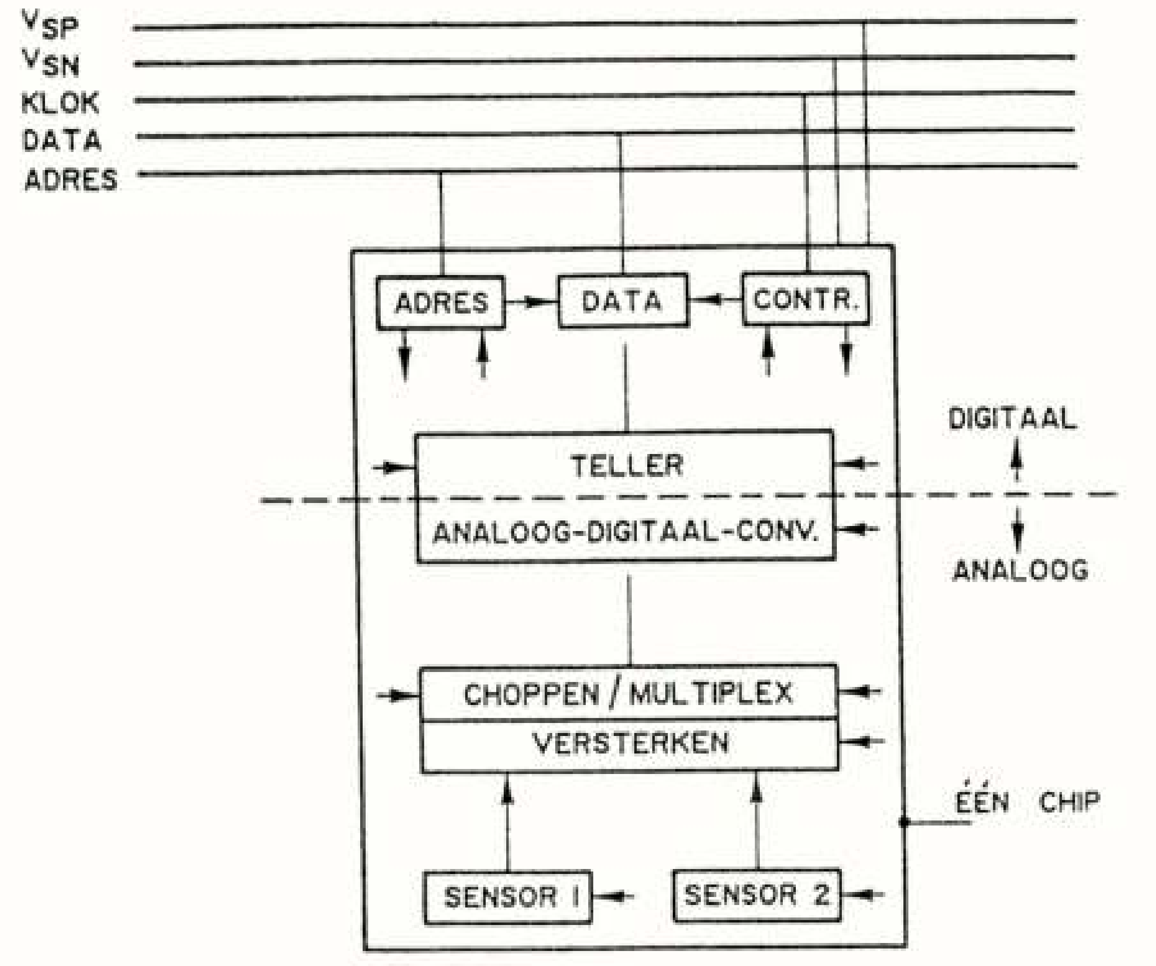


Fig. 11: Functies in een geïntegreerde intelligente sensor.

Schakelingen zonder externe componenten

De neiging zou kunnen bestaan te veronderstellen dat de elektronische circuits voor geïntegreerde intelligente sensoren tegenwoordig geen probleem meer vormen. Dat zou echter een vergissing zijn. Er zijn enkele stringente eisen, die normaal niet aan geïntegreerde schakelingen gesteld worden. Een lage kostprijs verbiedt bijvoorbeeld het gebruik van externe componenten: dus geen grote condensatoren, geen externe precisie weerstanden, of afregelcomponenten, en geen kwartskristal voor een interne klok. Bovendien zijn er beperkingen aan de complexiteit van de digitale schakeling vanwege de aanwezigheid van de sensor.

Een geïntegreerde intelligente sensor is samengesteld uit de volgende onderdelen (Fig.11): één of meer sensoren, operationele of instrumentele versterkers, chopper en multiplex schakelaars, een analoog-digitaal converter, een digitaal adres, bus-interface en processor.

Tabel 4a: SCHAKELINGEN ZONDER EXTERNE COMPONENTEN

ANALOGE SCHAKELINGEN	BEPERKINGEN
OPER./INSTR. VERSTERKER	
offset/ruis aanpassen	
impedantie aanpassen	
common-mode aanpassen	
vermogen versterken	
frequentie filteren	capaciteit
SCHAKELAAR	
choppen	
multiplexen	
ANALOOG-DIGITAAL OMZETTER	complexiteit
direkt	aantal bits
indirekt	capaciteit
frequentie	
duty-cycle	
sigma-delta	
dual-slope	
stochastisch	

Een overzicht van de beperkingen, die aan de circuits gesteld moeten worden, is weergegeven in Tabel 4. Voor de analoge circuits liggen er nauwelijks problemen bij de operationele en instrumentele versterkers, noch bij de schakelaars, maar wel bij de analoog-digitaal omzetter (ADC). Vele typen ADC's zijn te complex voor wat betreft het digitale gedeelte, of vanwege de benodigde externe nauwkeurige componenten, of vanwege de benodigde afregelprocedure. De directe omzetters zijn beperkt in het aantal bits vanwege de beperkte nauwkeurigheid van de onafgeregelde componenten op de chip. Daarom moet de toevlucht genomen worden tot de categorie van de indirecte omzetters. Deze typen gebruiken tijdsdeling als een nauwkeurige tussenstap op weg naar de digitale waarde. Als tussenstap komt in aanmerking de omzetting naar frequentie, duty-cycle en stochastisch signaal. Interessant zijn de sigma-delta, dual-slope en flip-flop omzetters.

Tabel 4b: SCHAKELINGEN ZONDER EXTERNE COMPONENTEN

DIGITALE SCHAKELINGEN	BEPERKINGEN
TELLER	
freq'ientie	
pulsduur	
middelen	
GEHEUGEN	PROM
buffer	
tabel	
adres	
programma	
CONTROLLER	complexiteit
uitvoering programma	
busprotocol	
DC	klok
frequentie	niveaus
I2C	traag
CAN	

De digitale functies, die we nodig hebben op de chip, zijn: tellers, geheugen en een controller. Aan de tellers behoeven geen beperkingen te worden gesteld. Echter, de programmable read-only memories (PROM) voor het vastleggen van het adres en bijvoorbeeld een ijktabel, vragen om speciale circuits of processtappen. De samenbouw hiervan met de sensor levert een beperking van de capaciteit van dit type geheugen. De samenbouw met de sensor op de chip levert ook een beperking in de complexiteit van de controller. Dit komt tot uitdrukking in een beperking van de programma-uitvoering en het busprotocol. Verder zal de bus een eigen klok moeten leveren omdat een chip zonder extern kristal geen nauwkeurige referentie-frequentie kan leveren. Het is overigens zeer wel mogelijk, dat in de toekomst een tijdsensor op de chip gemaakt kan worden voor de interne tijdreferentie.

Haalbaarheid

De haalbaarheid van de één-chip realisaties kan door veel oorzaken verhinderd worden. Een hybride tussenoplossing is dan mogelijk. Deze bestaat uit meerdere chips of sensoren in één behuizing.

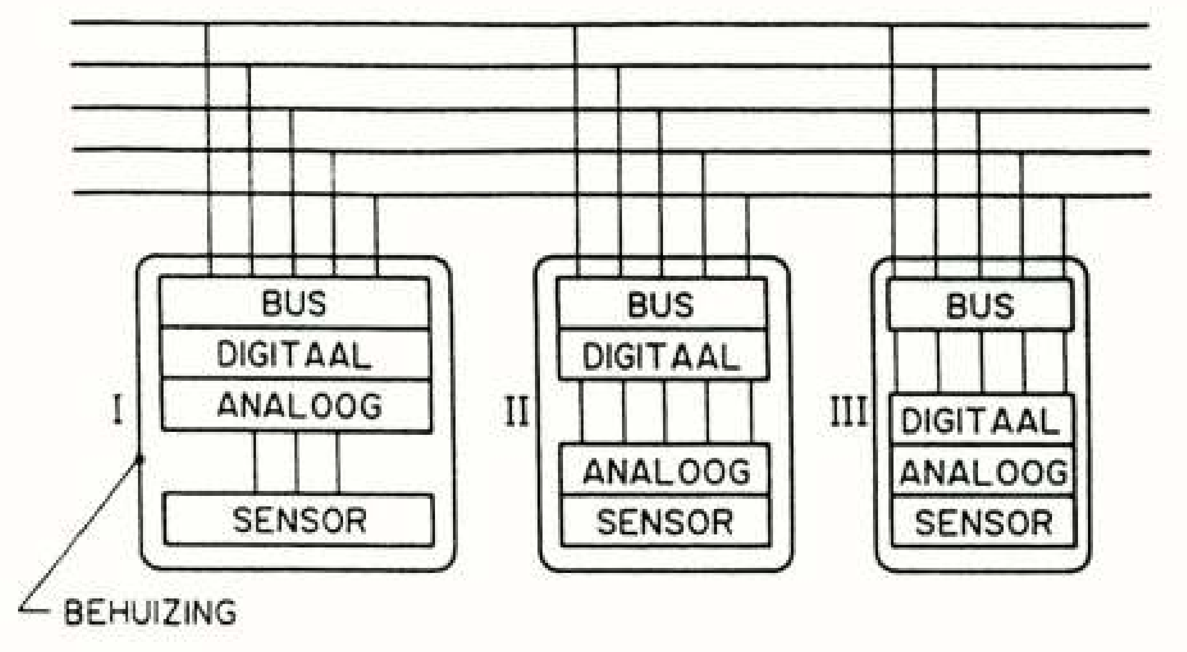


Fig. 12: Hybride realisaties met twee chips in één behuizing.

Enkele hybride oplossingen zijn interessant (Fig.12).

In een eerste geval worden de sensor en de elektronische schakeling op twee aparte chips gerealiseerd. Er kunnen principiële, maar ook economische redenen zijn waarom de sensor niet samen gebouwd kan worden met de schakeling. Zo kan de serie voor één type sensor te klein zijn. De schakeling wordt dan universeel gemaakt, zodat verschillende typen sensoren kunnen worden aangesloten.

In een tweede geval is de sensor en de analoge schakeling samengevoegd op één chip en de digitale schakeling op een andere. Dit gebeurt bijvoorbeeld wanneer de sensor en de analoge schakeling in een bipolair proces gemaakt worden en de digitale schakeling in CMOS technologie. Dit is voorlopig de meest goedkope oplossing.

In een derde geval is er een aparte chip voor het busprotocol, omdat bijvoorbeeld de busaandrijving teveel vermogen vraagt; of omdat een vertaalslag nodig is van het ene busprotocol naar het andere; of omdat aansluiting op een glasvezelkabel gewenst is.

Onderwijs en Onderzoek

Voor de ontwikkeling van een geïntegreerde intelligente sensor is een team nodig van experts uit meerdere disciplines. Er is zowel kennis nodig van de elektronica als van het domein van de sensor. Dit leidt tot veel langere ontwikkeltijden dan gebruikelijk voor een elektronische schakeling of sensor apart. Ontwikkeltijden van 10 tot 20 jaar zijn geen uitzondering. Er zijn niet veel industrieën die zich zo'n lange ontwikkeltijd kunnen veroor-

loven. Daarom is een goede samenwerking tussen universiteit en industrie onontbeerlijk. Het Laboratorium voor Elektronische Instrumentatie bezit dan ook vele industriële contacten.

V. CONCLUSIE

De automatisering van consumentenprodukten, zoals auto's, en industriële produktiemachines, zoals robots, wordt geremd door de achtergebleven ontwikkeling van sensoren.

Geïntegreerde intelligente sensoren leveren de oplossing voor massaproduktie van data-acquisitie systemen in consumentenprodukten.
Ook is dit type sensor wenselijk voor toepassing in industriële produktiemachines.

De activiteit van het bedrijfsleven op het gebied van sensoren is op zich een sensor, die de toekomstige industriële bedrijvigheid meet.
De Nederlandse industrie dreigt de boot te missen.

De ontwikkeling van geïntegreerde intelligente sensoren is multidisciplinair van aard en heeft een lange looptijd. Veel werk moet nog verzet worden zowel op het gebied van sensoren als van circuits. Samenwerking van universiteit en industrie is daarbij essentieel.

Hoewel er nog geen geïntegreerde smart sensor met een digitale bus interface op de markt is, is het verschijnen hiervan binnen de komende vijf jaar waarschijnlijk.

LITERATUUR

1. Marsh, P., "The mechanisation of mankind", New Scientist, 12 February 1981, pp. 90-93.
2. Fleck, J. and White, B., "National Politics and patterns of Robot diffusions", Proc. 14th ISIR, Gothenburg, 1984.
3. Middelhoek, S., "Integrated Sensors", Proc. 32d, Jap. Sensor Symp., Tsukuba Science City, Japan, 9-10 June 1984, IEE of Japan, pp. 1-10.
4. Höfflinger, B., Conte, G., Estève, D. and Weisglas, P., "Integrated Electronics for Automotive Applications in the EUREKA Program PROMETHEUS", Essirc '91, Grenoble, France, 19-21 September 1990, Invited papers pp. 13-17.
5. Heintz, F. and Zabler, E., "Application Possibilities and Future Chances of 'Smart' Sensors in the Motor Vehicle", Sensors and Actuators 13, 1989, pp. 39-50.
6. Middelhoek, S. and Audet, S.A., "Silicon Sensors", Academic Press, London 1989.
7. Huijsing, J.H., "Signal Conditioning on the Sensor Chip", Sensors and Actuators 10, 1986, pp. 219-237.

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

ELEKTRONISCHE SIGNAALVERWERKING IN PIENTERE SENSOREN EN PROCESSOREN

author Dr. Ir. G.C.M. Meijer
TU Delft
Fac. Elektrotechniek

September 30, 1991

Electronic signal processing in smart sensors and smart processors

In this paper concepts for signal processing in smart sensors are presented. These concepts have been applied in novel sensors which are discussed. For this discussion various types of sensors and sensor systems have been selected, such as:

- a smart temperature sensor for the –45°C to +130°C range
- a smart processor for Pt 100 temperature sensitive elements
- a smart displacement transducer

1. Inleiding

De technische ontwikkeling van sensoren is kostbaar, moeilijk en tijdrovend. De veranderingen op de sensormarkt zijn daardoor eerder evolutionair dan revolutionair. Met de komst van de pientere (smart) sensoren is er echter sprake van een zo'n belangrijke stap voorwaarts, dat men grote gevolgen kan verwachten voor het aanbod van produkten in de nabije toekomst.

Dat komt dan vooral doordat het met deze sensoren mogelijk wordt om op eenvoudige wijze computers met de buitenwereld te verbinden en op deze wijze computer-intelligentie te combineren met zintuiglijke waarneming: ogen, oren en neuzen voor onze computers dus.

Eén van deze sensoren is inmiddels als produkt op de markt gekomen. Het is een temperatuursensor, gefabriceerd in de allermodernste chiptechnologie door een Nederlands bedrijf, dat de toepasselijke naam SMARTEC draagt.

Het pientere van "smart sensors" zit hem in de manier van signaalbewerking. De signalen die men wil overdragen, worden zodanig bewerkt dat de computer of microcontroller ze kan begrijpen zonder dat daarvoor extra schakelingen nodig zijn. Het gebruik van dure A-D omzetters met alles wat daarbij hoort is dus overbodig. Het feit dat de sensor rechtstreeks in verbinding staat met de computer biedt grote voordelen, zoals het gebruik maken van de geheugen- en rekencapaciteit van de computer: Behalve het te meten signaal verstuurt de "smart sensor" ook referentiesignalen. Hierdoor is het mogelijk om *absolute* metingen door *relatieve* te vervangen, waardoor men zelfs met een matige kwaliteit van goedkope elektronische componenten een superieure kwaliteit van de signaaloverdracht kan bereiken. Verder kan men door het combineren van bijv. drukmeting met temperatuurmetingen heel goed voor de temperatuurafhankelijkheid van de drukgevoelige elementen compenseren.

Andere belangrijke voordelen zullen zijn: de geringe storingsgevoeligheid en de minimalisering van de benodigde bedrading. Deze voordelen zijn zo belangrijk dat de andere extraatjes, zoals adresseerbaarheid en betere kwaliteit tegen lagere kosten, als toegiften mogen worden beschouwd.

In dit artikel worden de concepten voor de signaalverwerking in pientere sensoren gepresenteerd. De toepassing van deze componenten wordt besproken en geïllustreerd met voorbeelden ontleend aan recente publicaties over pientere sensoren.

2. Systeem organisatie

Naar onze verwachting zal de doorbraak op het gebied van de pientere sensoren en processen plaatsvinden op het gebied van de goedkope massaprodukten voor consumententoepassingen.

De kostprijs van dergelijke sensoren en van de bijbehorende systemen zal uitermate laag moeten zijn, hetgeen mogelijk is in de opzet van Fig. 1.

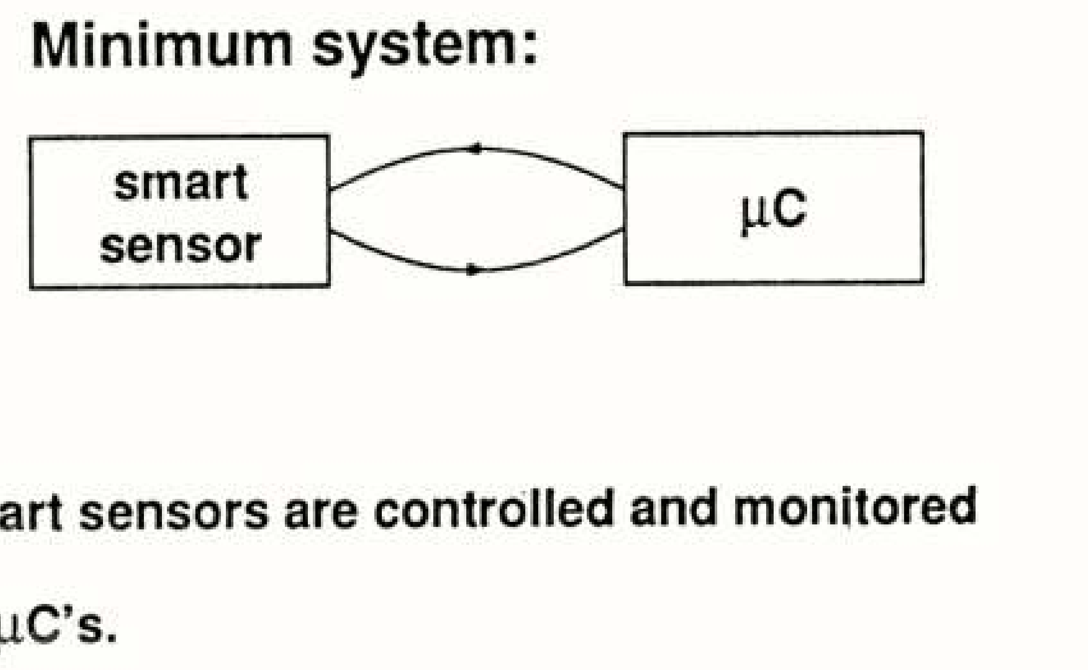


Fig. 1 Een eenvoudig en goedkoop smart sensor systeem.

De systeemkosten kunnen zo laag zijn omdat zowel de microcontroller (μC) als de pientere sensor goedkope onderdelen zijn; bovendien is de microcontroller in vele produkten reeds aanwezig en legt de sensor beslag op slechts één of twee van de vele I-O aansluitpennen.

Ondanks de eenvoud van de opzet kan de kwaliteit van een dergelijk systeem zeer hoog zijn, hetgeen met name te danken is aan de mogelijkheid om met de μC te multipliceren en om data te onthouden en te combineren. Ook de snelheid van zo'n systeem kan hoog zijn en die van conventionele systemen ruimschoots overtreffen. Indien het geen bezwaar is om meerdere communicatielijnen aan te brengen, dan kan men vanuit de μC ook schakelaars in de sensor bedienen om, bijvoorbeeld afhankelijk van het belang van de gemeten grootheden, de datastroom te regelen en zodoende snelheid tegen nauwkeurigheid uit te wisselen.

Hoewel pientere sensoren voor low-cost toepassingen ontworpen worden, zijn ze ook geschikt voor de meer complexe en industriële toepassingen. Figuur 2 toont een opzet waarbij de sensoren en processoren deel uitmaken van een hiërarchisch systeem.

Soms is het om fysische of economische redenen niet mogelijk om het sensor-element op dezelfde chip te integreren als de elektronische schakelingen.

Zoals bijvoorbeeld voor temperatuursensoren voor temperaturen hoger dan 200°C. In dat geval scheidt men het sensorelement van de processor. Indien de processor verder gelijk is aan die in pientere sensoren dan spreken we van een pientere processor.

De microcontrollers vormen in meerdere opzichten een welhaast ideale combinatie met de smart sensors: voor een zeer lage prijs wordt een intelligent meetsysteem gerealiseerd dat bovendien erg flexibel en snel is.

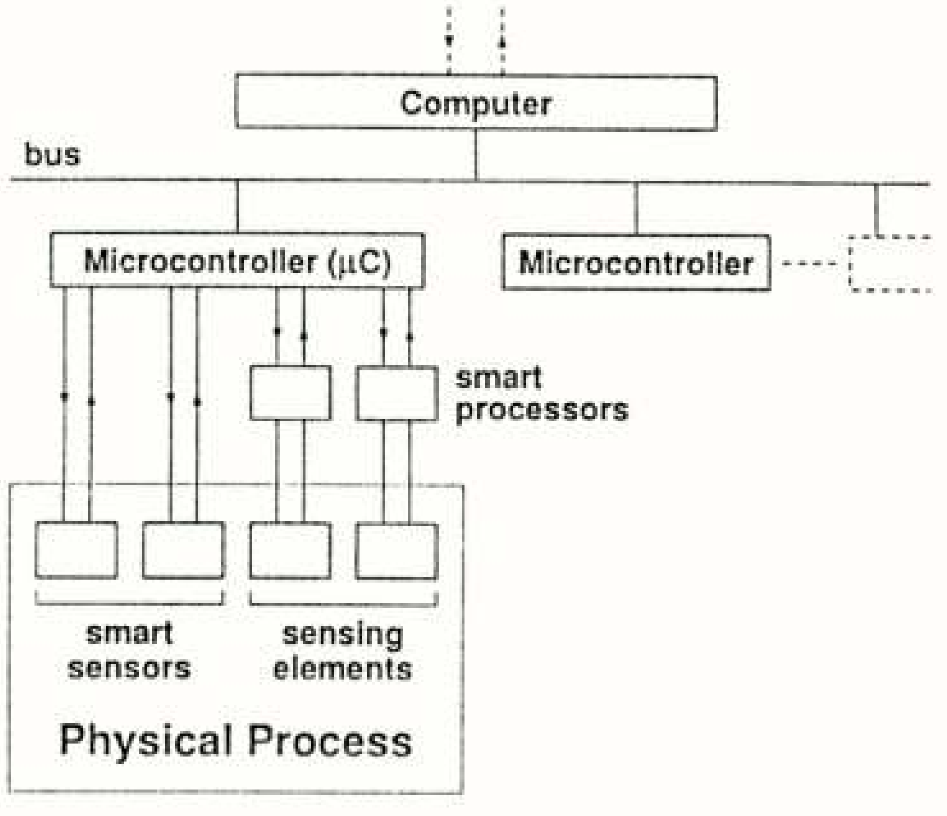


Fig. 2 Een hiërarchisch opgezet meetsysteem.

De microcontroller kan naar verkiezing als een los onderdeel dan wel als on-chip element worden gebruikt. De te vervullen functies kunnen als volgt over de pientere sensor en de µC worden verdeeld.

De pientere sensor voorziet in:

- het waarnemen van de fysische grootheid
- de instelling van het sensor element
- het multiplexen van signalen
- het versterken en vergelijken van signalen
- de interfacing met de microcontroller.

Een pientere processor vervult dezelfde functies met uitzondering van de eerste. De microcontroller heeft de volgende taken:

- het verzamelen, combineren en bewerken van data
- het bedienen van schakelaars in de sensor om wijzigingen aan te brengen in de snelheid, het bereik en de modi van de sensor
- het leveren van een gestandaardiseerd uitgangssignaal.

In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de concepten voor de interne signaalverwerking in de pientere sensoren.

3. Concepten voor pientere signaalbewerking

De invloed van de foutenbronnen die in conventionele systemen de grootste problemen veroorzaken, kan in smart sensors in belangrijke mate geëlimineerd worden door gebruik te maken van de geheugencapaciteit van de µC's en de mogelijkheid om met µC's te multiplexen. De belangrijkste problemen ontstaan door systematische fouten en door onbekendheid van de conversieparameters. Deze problemen kunnen volgens verschillende methoden geëlimineerd worden:

De 2-signaalmethode

Bij deze methode wordt er behalve de te meten grootheid S_x, op dezelfde wijze ook nog een referentiegrootheid S_1 gemeten. Als meetresultaat kan dan gekozen worden voor de verhouding $M_{2r} = S_x/X_1$. In deze verhouding zijn alle multiplicatieve parameters en dus ook de systematische multiplicatieve fouten geëlimineerd. Deze methode wordt gekozen in tal van meetsystemen, zoals de dual-slope A-D omzetters. In een alternatieve methode wordt als meetresultaat het verschil $M_{2v} = S_x - S_1$ gekozen. In dat geval worden alle additieve systematische fouten en parameters geëlimineerd.

De 3-signaalmethode

Bij deze methode worden er behalve de te meten grootheid S_x op dezelfde wijze twee referentiegrootheden S_1 en S_2 gemeten. Als meetresultaat wordt gekozen voor de verhouding $M_3 = (S_x - S_1)/(S_2 - S_1)$. In dit geval zijn zowel de additieve als de multiplicatieve systematische fouten en parameters geëlimineerd. Het referentiesignaal S_1 mag ook gelijk zijn aan nul of aan $-S_2$, hetgeen vaak een vereenvoudiging van het systeem inhoudt.

Met de 2- en de 3-signaalmethode kan de systeemontwerper de systeemeigenschappen drastisch verbeteren, zonder dat er bijzondere eisen aan de elektronische componenten behoeven te worden gesteld. Een verdere verbetering van de systeem-eigenschappen kan vervolgens bereikt worden door het systeem te optimaliseren voor wat betreft de

- lineariteit
- ruiseigenschappen
- gevoeligheid voor storingen.

Indien het signaal voldoende versterkt is, wordt het omgevormd tot een tijdgemoduleerd signaal dat "begrepen" kan worden door µC's.

Geschikte grootheden om te moduleren zijn:

- de frequentie
- de periode
- de duty-cycle.

De modulatie kan zowel synchroon (met een klok) als asynchroon geschieden. We zullen nu de voor- en nadelen van de diverse modulatievormen bespreken.

4. Modulatievormen

A. Een duty-cycle oscillator

Eén van de meest aantrekkelijke modulatievormen is de duty-cycle modulatie. Stel dat men de verhouding van twee stromen I_1 en I_o wil weten, dan kan men met deze stromen via een schakelaar een condensator beurtelings ontladen en opladen (Fig. 3a).

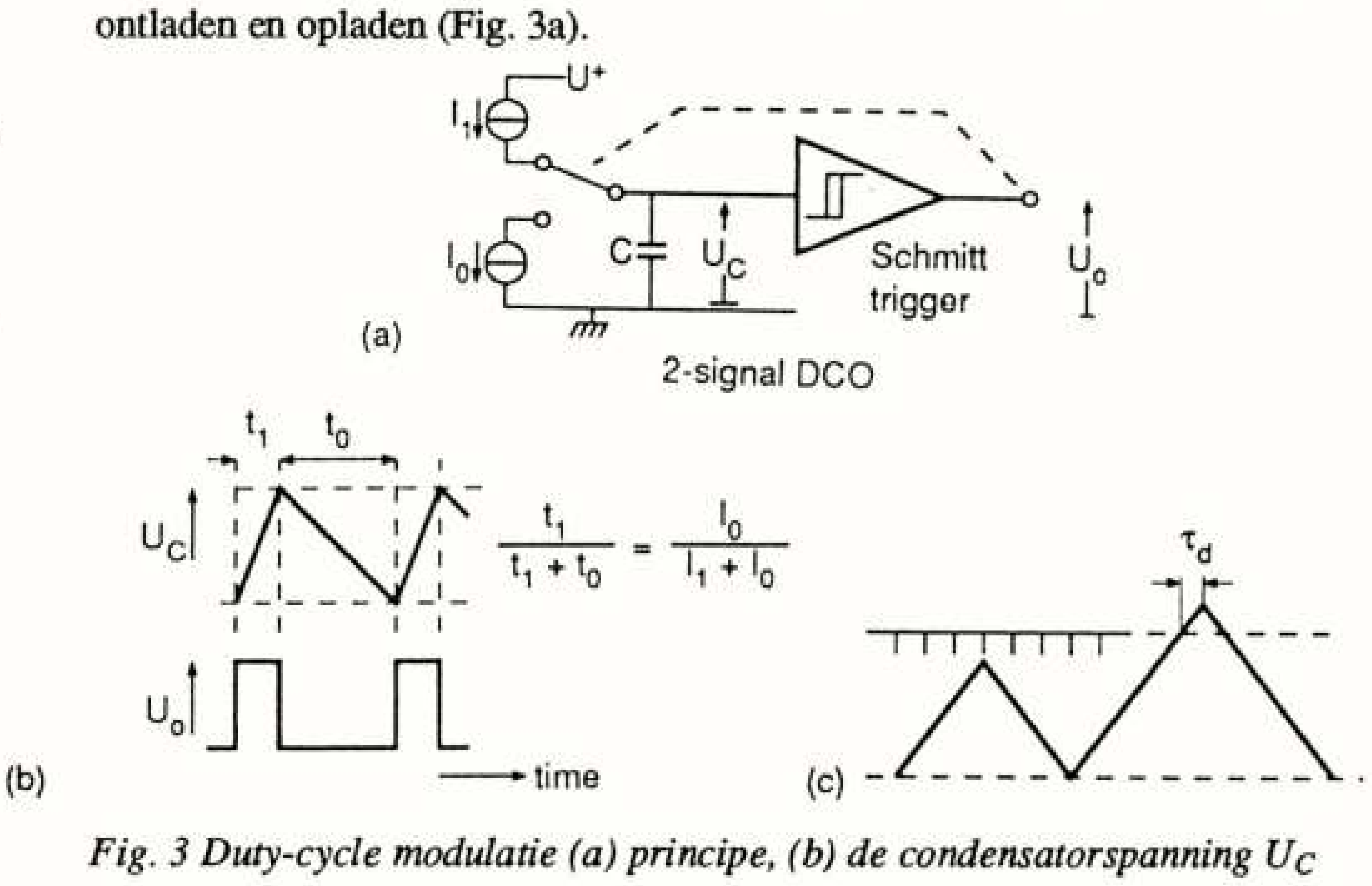


Fig. 3 Duty-cycle modulatie (a) principe, (b) de condensatorspanning U_C en de uitgangsspanning U_o versus de tijd, (c) de invloed van spikes en tijdvertraging.

De schakelaar wordt bediend door een Schmitt-trigger, zodra de condensatorspanning een drempelwaarde overschrijdt. De verhouding van de stromen $I_o/(I_1 + I_o)$ *is dan gelijk aan de duty-cycle* $t_1/(t_1 + t_o)$ van het blokvormige uitgangssignaal (Fig. 3b).

Deze modulatievorm kent behalve zijn eenvoud nog enkele andere voordelen:

- Het signaal is relatief ongevoelig voor interferentie en tijdsvertraging. Spikes op de drempelspanning en een vertraging τ_d in de schakelaktie (Fig. 3c) beïnvloeden slechts de frequentie zonder dat de duty-cycle erdoor wordt aangetast.
- Het uitgangssignaal wordt gedecodeerd via een analoge of digitale integratie, hetgeen een extra filtering voor allerlei ruis- en stoorsignalen impliceert.

Een mogelijk nadeel van duty-cycle modulatie is de relatief sterke kwantisatieruis van de microcontroller (Fig. 4).

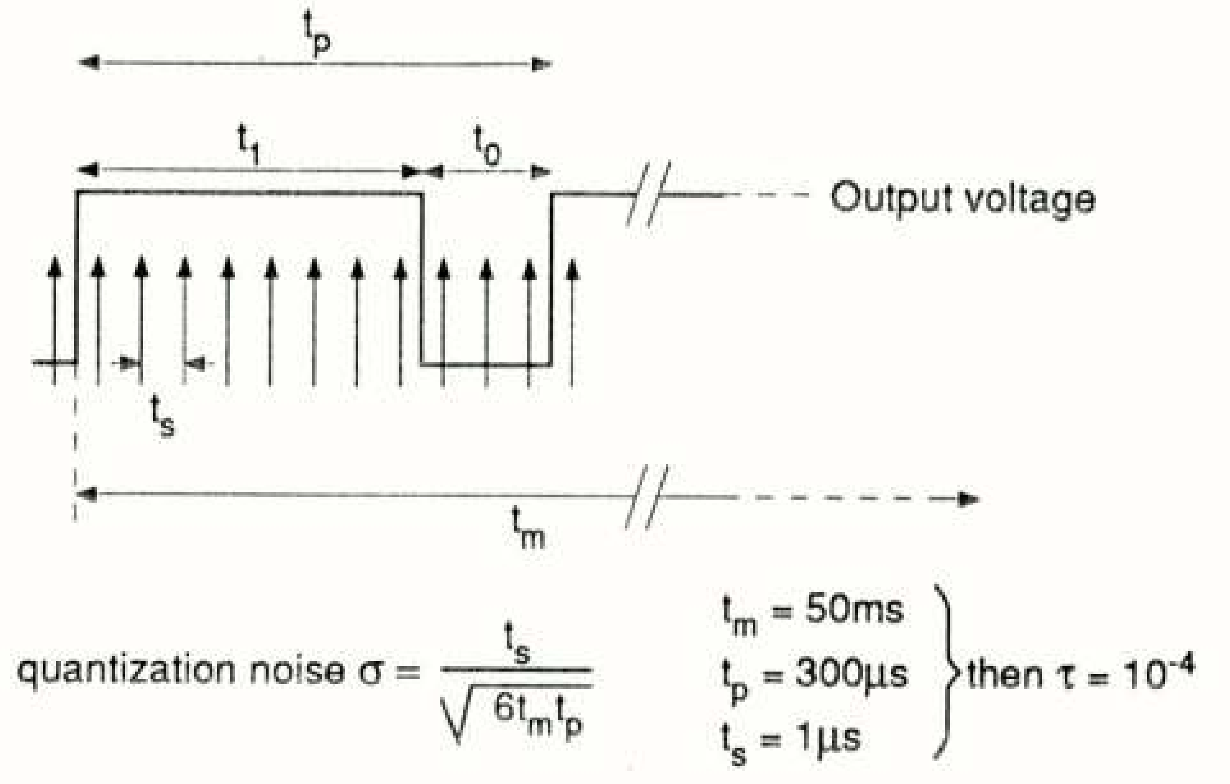


Fig. 4 Het bemonsteren van een duty-cycle gemoduleerd uitgangssignaal met asynchrone klokpulsen veroorzaakt kwantisatieruis.

De microcontroller genereert de bemonsteringspulsen, die geteld worden in het "1" register als het uitgangssignaal hoog is. In een tweede register worden de bemonsteringspulsen gedurende de meettijd t_m geteld. Indien de inhoud van dit tweede register een zekere waarde overschrijdt, wordt het tellen gestopt op een flank van het te meten signaal en wordt, door de inhoud van beide registers op elkaar te delen, de duty-cycle bepaald. Omdat de bemonsteringstijdstippen niet gesynchroniseerd zijn met het te bemonsteren signaal is er enige onzekerheid over de start- en stopmomenten van de tijdintervallen, hetgeen de kwantisatieruis veroorzaakt. Voor de standaarddeviatie τ_{dc} van deze ruis kan berekend worden dat geldt

$$\tau_{dc} = \frac{t_s}{\sqrt{6 t_m t_p}}, \qquad (1)$$

hierin is t_s het bemonsteringstijdinterval, t_p de periode van het signaal en t_m de totale meettijd, welke een geheel aantal malen de periode van het d.c.-gemoduleerde signaal is. Het probleem van de kwantisatieruis is opgelost bij de andere vormen van modulatie, die in Fig. 5 zijn afgebeeld.

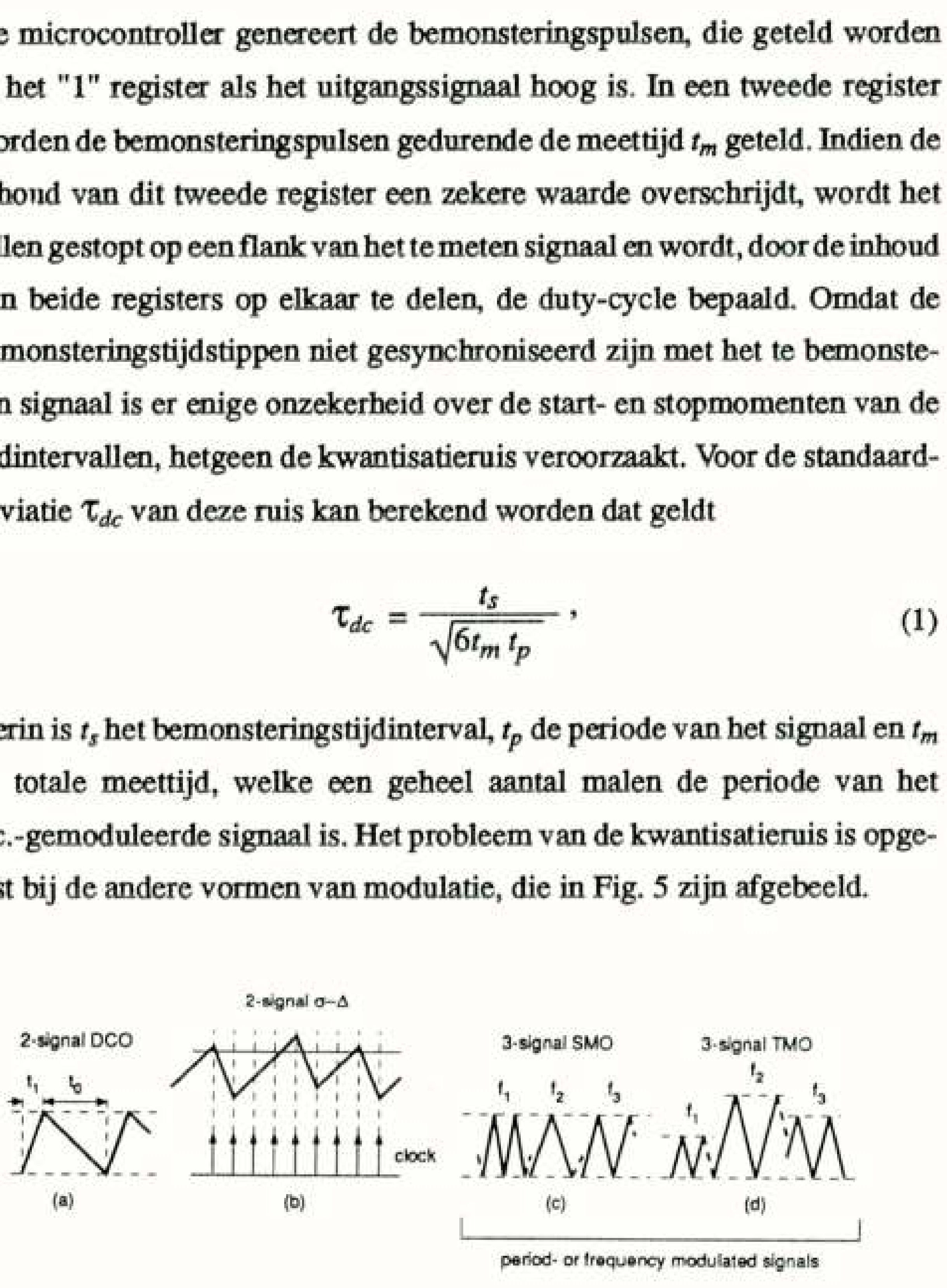


Fig. 5 De condensatorspanningen bij de diverse vormen van modulatie (a) duty-cycle modulatie, (b) τ – Δ modulatie, (c) 3-signaal stroomgemoduleerde oscillator, (d) 3-signaal drempelspanningmodulatie.

B. Een sigma-delta modulator (Fig. 5b)

De sigma-delta modulator vertoont veel overeenkomst met de duty-cycle oscillator. Het belangrijkste verschil, is het gebruik van een klok die de omschakelmomenten van de Schmitt-trigger bepaalt zodra een drempelwaarde wordt overschreden. Voor de standaarddeviatie τ_{sd} van de kwantisatieruis kan berekend worden dat geldt:

$$\tau_{sd} = \frac{t_s}{t_m \sqrt{6}}, \qquad (2)$$

Indien $t_m >> t_p$ dan is de kwantisatieruis bij sigma-delta modulatie aanzienlijk minder dan bij duty-cycle modulatie, hetgeen te danken is aan de synchronisatie bij het omschakelen.

C. Een 3-signaal stroom-gemoduleerde oscillator (Fig. 5c)

Bij deze oscillator zijn de op- en ontlaadstromen van de condensator evenredig met de te meten signalen; zodat gedurende een geheel aantal perioden N de frequentie evenredig is met die signalen. Op deze wijze worden achtereenvolgens drie signalen gemeten, waarbij één van de drie signalen de te meten grootheid representeert en de andere twee signalen referentiesignalen zijn, overeenkomstig de concepten die in de vorige paragraaf zijn besproken. De kwantisatieruis is in dezelfde orde van grootte als bij sigma-delta modulatie.

D. Een 3-signaal drempelspanning-gemoduleerde oscillator (Fig. 5d)

Bij dit type oscillator wordt de drempelspanning gemoduleerd door de signalen (Fig. 5d). Deze oscillator heeft dezelfde voordelen als de stroomgemoduleerde oscillator en is bovendien nog ongevoelig voor vertragingstijden van de schakelaars. Een nadeel is dat in dit geval geen spanningsafhankelijke condensatoren (zoals junctie-condensatoren) mogen worden gebruikt, omdat dit niet-lineariteit zou veroorzaken.

In de nuvolgende paragrafen zullen we enkele praktische voorbeelden bespreken van pientere sensoren, waarin de besproken concepten en modulatievormen zijn toegepast.

5. Een pientere temperatuursensor

Het temperatuurgevoelige element in de nieuwe temperatuursensor van SMARTEC wordt gevormd door een stelsel van bipolaire transistoren. De basis-emitter-spanning van zo'n transistor heeft een negatieve temperatuurcoëfficiënt (Fig. 6).

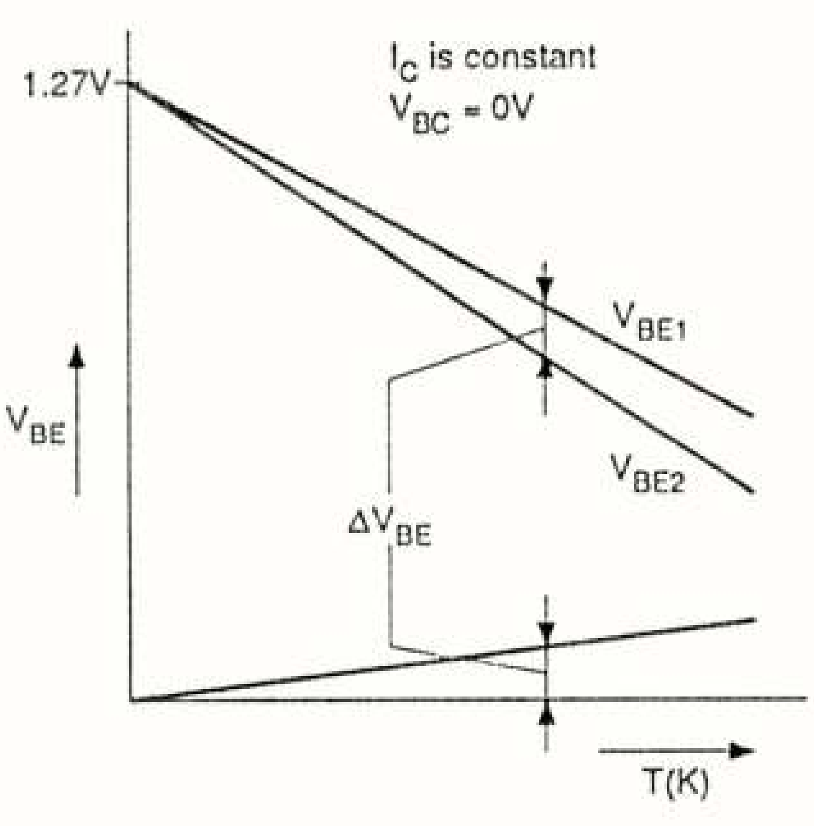


Fig. 6 De temperatuurafhankelijkheid van basis-emitterspanningen en van de verschillen daarin.

Het verschil ΔV_{BE} tussen de basis-emitterspanningen V_{BE1} en V_{BE2} van twee transistoren die ingesteld staan op een verschillende emitter-stroomdichtheid heeft daarentegen een positieve temperatuur-coëfficiënt en is evenredig met de absolute temperatuur. Door de verschillende temperatuurafhankelijke spanningen te versterken en op een geschikte wijze met elkaar te combineren, kunnen stromen met elke gewenste lineaire temperatuurafhankelijkheid verkregen worden [1]. Met twee van deze stromen wordt een condensator op- en ontladen volgens het concept van Fig. 3a, zodat een temperatuurafhankelijke duty-cycle verkregen wordt welke lineair met de temperatuur varieert. Op dezelfde chip waarop de sensor en de bewerkingsschakelingen zijn ondergebracht bevindt zich tevens een calibratienetwerk, waarmee de sensor tijdens produktie wordt gecalibeerd, zodat min of meer identieke schakelingen ontstaan.

De absolute nauwkeurigheid bedraagt 0,5°C in het bereik van –30°C tot +100°C en 1°C in het bereik van –45°C tot +130°C. De resolutie is veel beter en ligt in de orde van 1 milligraad. Het stroomverbruik bedraagt slechts 150 µA bij een voedingsspanning van 5V. Het uitgangssignaal is een duty-cycle-gemoduleerde blokgolf (Fig. 7a).

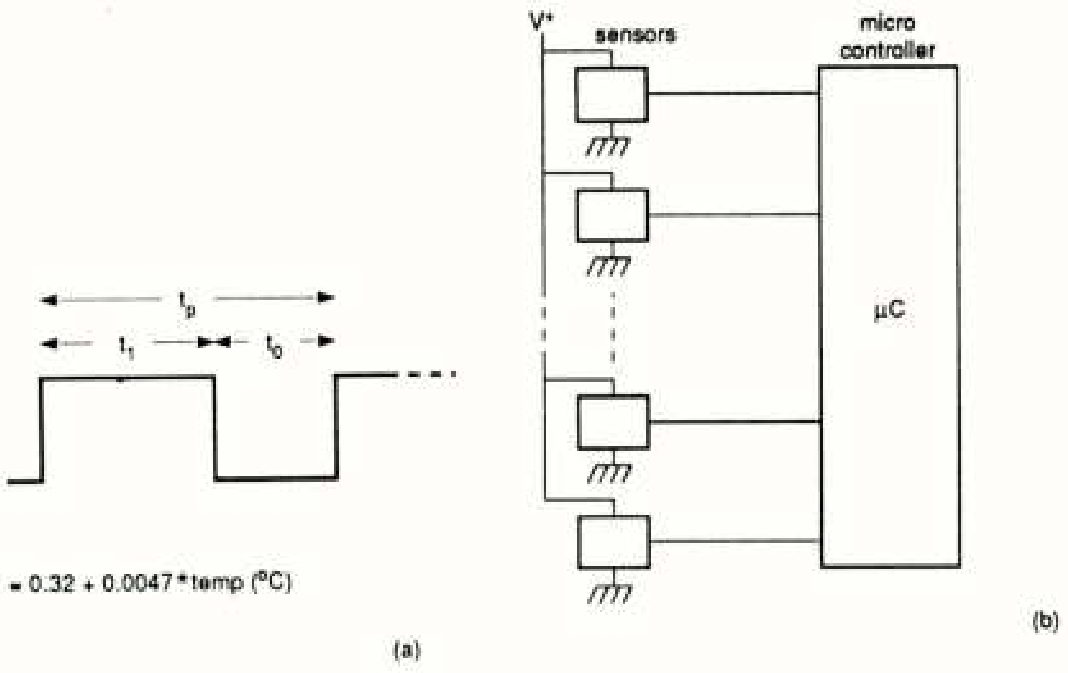


Fig. 7 De pientere temperatuursensoren; (a) uitgangssignaal, (b) een aantal van deze sensoren kunnen rechtstreeks op de I/O pinnen van een microcontroller worden aangesloten.

De reeds eerder genoemde voordelen van deze vorm van modulatie leiden tot de volgende aantrekkelijke praktische eigenschappen:

- Het signaal is vervat in een verhouding van tijden t_1/t_p, en is onafhankelijk van de amplitude en van de frequentie en dus onafhankelijk van alle elementen die de amplitude of de frequentie bepalen.
- Het signaal kan met microcontrollers en computers direct uitgelezen worden.
- De gemiddelde waarde van het signaal is evenredig met het signaal, zodat het signaal ook met analoge multimeters gemeten kan worden.
- Het signaal wordt gedecodeerd via een analoge of digitale integratie. Zo'n integrator werkt als een laagdoorlaatfilter dat eventuele stoorsignalen wegfiltert. Het signaal is dus relatief ongevoelig voor storing.
- Voor verzending over glasvezels is zo'n signaal zeer geschikt. De duty-cycle gemoduleerde blokgolf wordt gebruikt om aan de zendkant een lichtbron aan en uit te schakelen, hetgeen aan de ontvangzijde eenvoudig en nauwkeurig gedetecteerd kan worden.

Bij het aansluiten van een hele groep sensoren op één microcontroller blijkt er een nieuw voordeel te bestaan: er is geen multiplexer nodig. Iedere sensor is slechts met één pin van de microcontroller verbonden (Fig. 7b). Op deze wijze kunnen er bijvoorbeeld ruim twintig sensoren op een microcontroller van het type MCS-51 worden aangesloten. De microcontroller zorgt voor het multiplexen. De microcontrollers en smart sensoren vormen een ideale combinatie voor een lage kostprijs. De interfacing is erg plezierig omdat er maar weinig draden nodig zijn en de communicatie erg snel kan zijn. De uitleessnelheid kan bovendien door de microcontroller verhoogd worden indien dat, afhankelijk van het belang van de waarnemingen, gewenst is.

De meeste foundries hebben tegenwoordig complete microcontrollers in hun "modellen bibliotheek" opgenomen. Het is daardoor mogelijk om deze controllers op een willekeurige andere chip mee te integreren. Dat geldt trouwens ook voor de smart temperatuur sensor, die eveneens in de "bibliotheek" van een foundry aanwezig is.

De gangbare uitvoeringsvorm is echter die waarbij de chip is ondergebracht in een TO-18 behuizing. Door z'n cylindrische vorm kan zo'n component gemakkelijk in een geboord gat worden aangebracht, terwijl het metaal van de verpakking voor een goed thermisch contact zorgt. Andere uitvoeringsvormen voor bijvoorbeeld oppervlaktemontage zijn eveneens mogelijk.

6. Een pientere processor voor Pt 100 elementen

Het werkgebied van elektronische siliciumschakelingen is beperkt tot het temperatuurbereik van ongeveer –55°C tot 150°C. Om temperaturen buiten dit bereik te meten is het nodig om het sensorelement te scheiden van het elektronische circuit. Door Meijer en Voorwinden is onlangs [3] een nauwkeurige processor beschreven, waarmee signalen van platina weerstanden van het type Pt 100 voor het meetbereik van –200°C tot +850°C verwerkt kunnen worden.

Het elektronische circuit behoeft niet gecalibreerd te worden. Het uitgangssignaal is frequentie-gemoduleerd en is geschikt als ingangssignaal voor microcontrollers. In het ontwerp is geen moeite gedaan om het uitgangssignaal te lineariseren, omdat deze taak gemakkelijk door de microcontroller kan worden vervuld.

De processor kan beschouwd worden als een zeer nauwkeurige weerstandsmeter, die op een enkele chip kan worden vervaardigd. Het basisidee is getoond in Fig. 8.

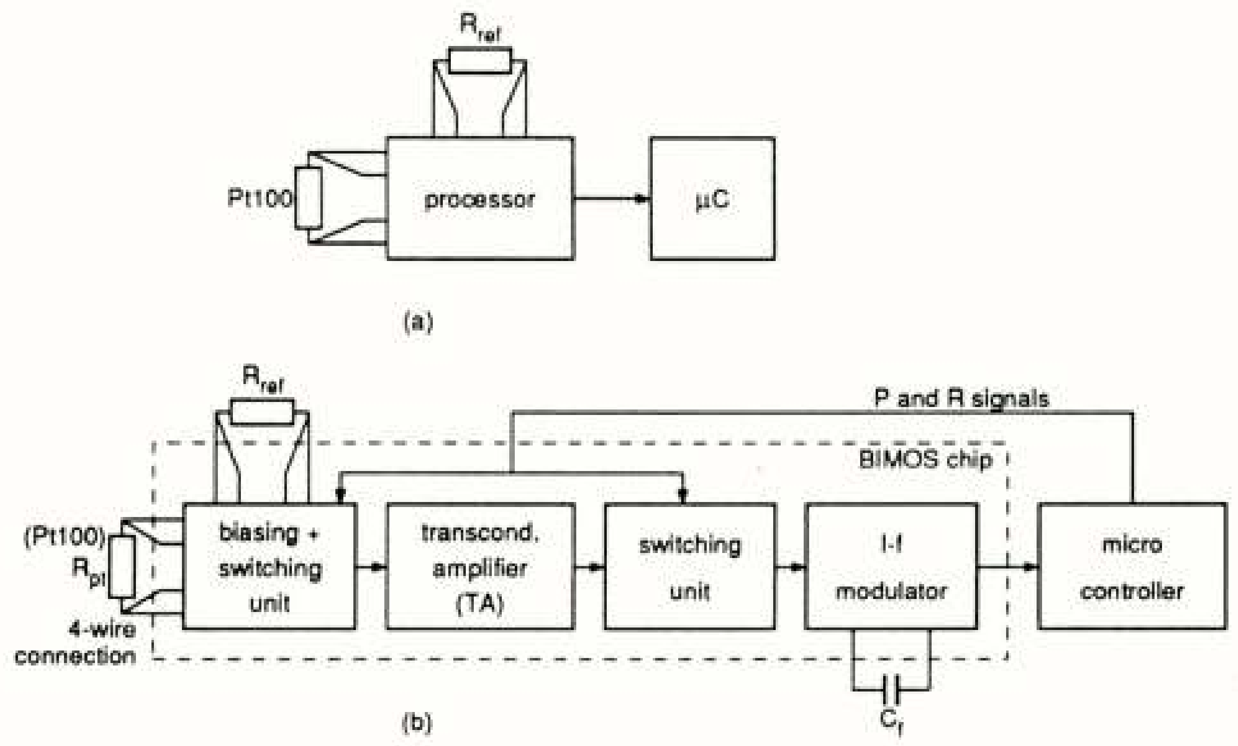


Fig. 8 Een pientere processor voor Pt 100 signalen; (a) basis idee, (b) blokschema van het circuit. De weerstanden worden in een 4-draads configuratie aangesloten, teneinde de invloed van de weerstand van de aansluitdiode te elimineren.

Behalve de onbekende weerstand van de Pt 100 wordt tevens een referentieweerstand R_{ref} op een identieke wijze gemeten. Volgens de 3-signaalmethode (zie paragraaf 3) moet ook nog een derde weerstand gemeten worden. In de beschreven methode wordt dat echter niet gedaan. Een consequentie hiervan is dat additieve fouten, zoals offset van de ingangsversterkers, niet automatisch worden geëlimineerd. Om dit alsnog te bereiken worden schakeleenheden toegepast die de ingangsklemmen alternerend ompolen, waarbij de offsetspanning ongewijzigd blijft.

De te meten spanningen worden in stromen omgezet door een zeer lineaire transconductantieversterker. Deze stromen worden geconverteerd in frequenties door een VCO.

De microcontroller bepaalt de periodeduur van het uitgangssignaal en zet, na een zeker aantal perioden, de schakelaars in de processor in de alternatieve posities. Voor deze acties zijn twee extra besturingsdraden nodig, welke vermeden hadden kunnen worden indien de BIMOS chip met

een teller was uitgebreid. Voor een toekomstig ontwerp ligt een dergelijke uitbreiding in de lijn van de verwachting. Voor de capaciteit C_f is een externe condensator gekozen teneinde een uitvoering op een BIMOS masterchip mogelijk te maken. Bij een full-custom ontwerp kan ook een on-chip condensator worden gebruikt, mits de grootte ervan beperkt blijft tot waarden kleiner dan 1nF.

Hoewel er enige verbeteringen mogelijk zijn, levert het circuit uitstekende prestaties en demonstreert de kracht en eenvoud van smart processors.

De onnauwkeurigheid van het elektronische circuit wordt opgeteld bij die van de Pt 100. In figuur 9 zijn beide onnauwkeurigheden met elkaar vergeleken.

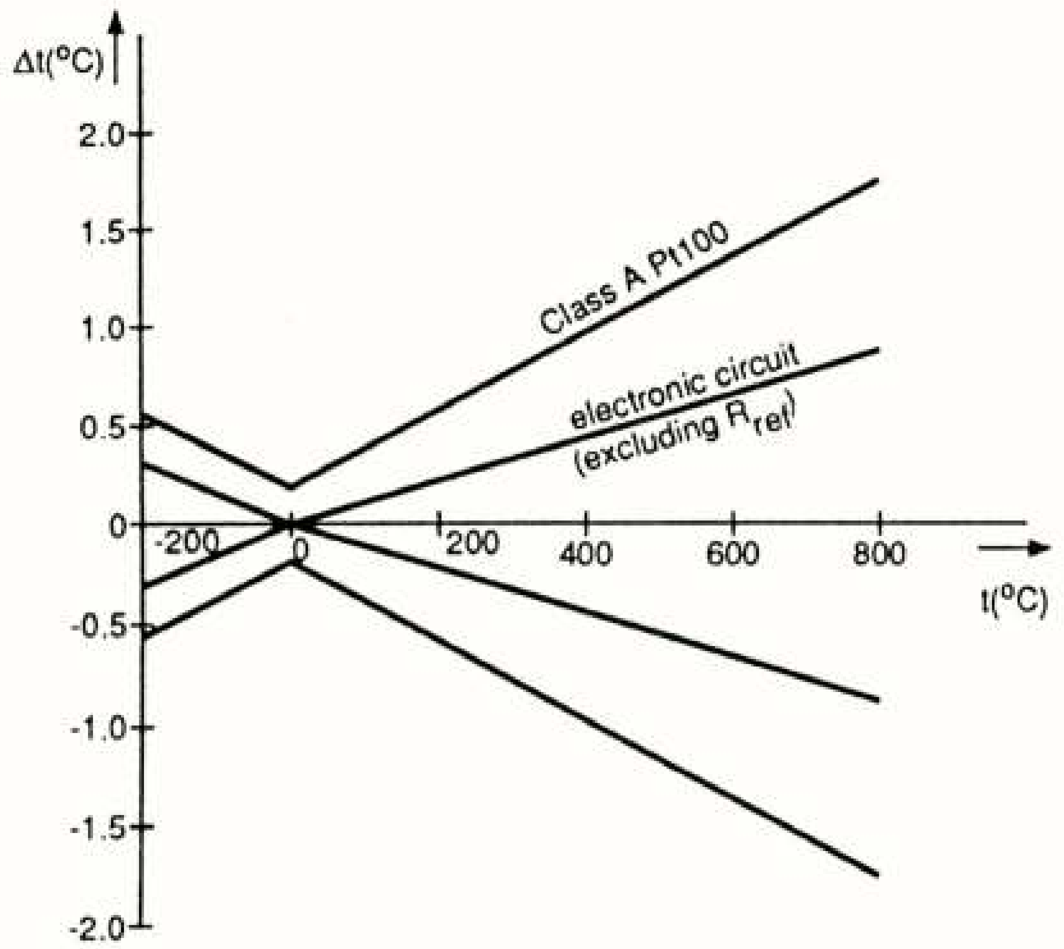


Fig. 9 De onnauwkeurigheid van het elektronische systeem vergeleken met de toleranties van een klasse A Pt 100 weerstand.

De meetstroom door de Pt 100 weerstand is gekozen als een compromis tussen minimum zelfopwarming en maximaal signaal en bedraag 1mA. Een complete meetcyclus duurt 200ms.

7. Een pientere positie-opnemer

In de nieuwe positieopnemer die onlangs door Van Drecht e.a. [4] is gepresenteerd, is het 3-signaal concept (zie paragraaf 3) volledig toegepast. Hierdoor bleek het mogelijk om met eenvoudige middelen een zeer nauwkeurige processor te realiseren. De positie-opnemer is geschikt voor het meten van verplaatsingen over een bereik van 3mm met een onnauwkeurigheid van minder dan 10^{-3} en een resolutie van 10^{-4}. Dergelijke positieopnemers kunnen toegepast worden in, bijvoorbeeld, drukmeters, krachtmeters en weegapparatuur. In figuur 10 wordt het principe getoond van het positie-gevoelige element (PSD). Een lineaire PSD kan beschouwd worden als een elektro-optische potentiometer waarbij een invallende lichtbundel een fotostroom genereert over een gesperde p-n diode (Fig. 10a). Eén van de diodelagen wordt tevens als resistieve laag gebruikt. Indien de eindcontacten een gelijke potentiaal hebben (Fig. 10b), dan splitst de fotostroom I_{ph} zich in twee componenten I_1 en I_2, waarbij

$$I_1R_1 = I_2R_2. \tag{3}$$

Indien we de relatieve positie aangeven met een getal x, dat van −1 voor de onderste positie varieert tot +1 voor de bovenste positie, dan kunnen we afleiden dat geldt:

$$x = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \tag{4}$$

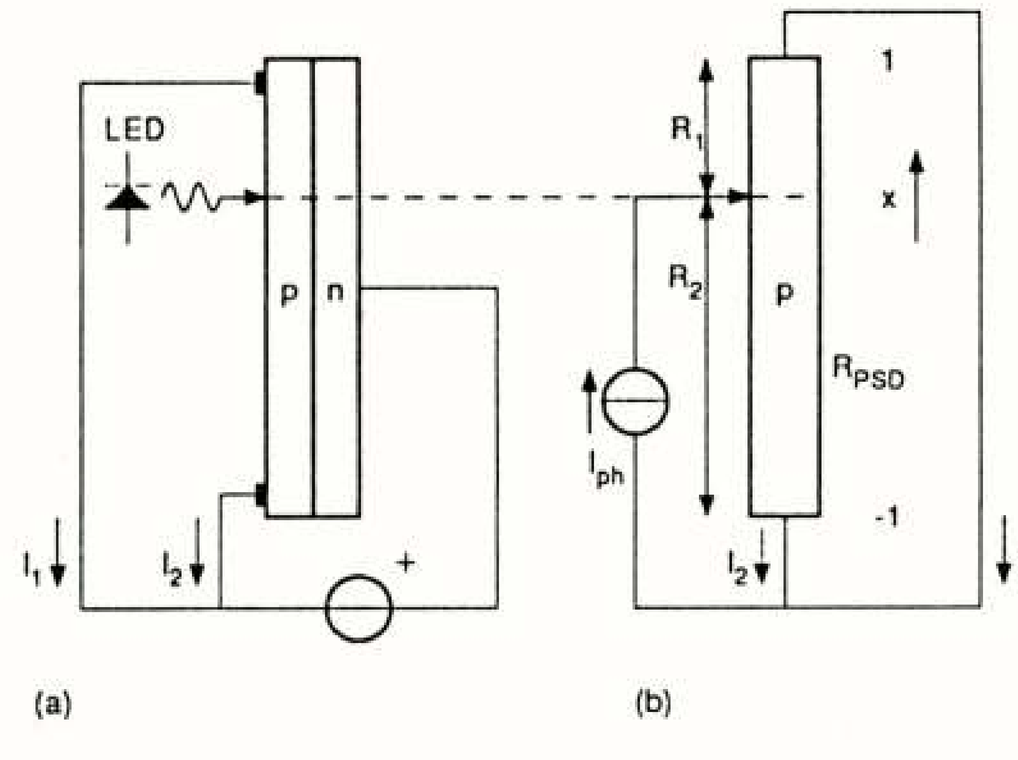


Fig. 10 (a) Principe van een lineaire positie-gevoelige detector (PSD), (b) vereenvoudigd model.

Figuur 11 toont het blokschema van een zeer nauwkeurige processor die de PSD signalen verwerkt en omzet in periode-gemoduleerde signalen. Teneinde alle lineaire fouten te elimineren wordt er behalve de stromen I_1 en I_2 ook nog een derde stroom I_o gemeten. Deze stroom mag gelijk zijn aan nul.

De drie stromen worden succesievelijk geconverteerd in periode-gemoduleerde signalen, waarbij gebruik gemaakt wordt van een VCO die een blokvormig uitgangssignaal genereert met een periode T_{pi} welke afhangt van de te meten stroom volgens de lineaire vergelijking:

$$T_{pi} = aI_i + b, \; (i = 0, 1, 2). \tag{5}$$

Indien $I_0 = 0$, dan volgt er uit (4) en (5) voor de relatieve positie dat

$$x = \frac{T_{p1} - T_{p2}}{T_{p1} + T_{p2} - 2T_{p0}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \tag{6}$$

Dit resultaat is onafhankelijk van de constanten a en b en daarom van alle multiplicatieve en additieve fouten die in deze constanten tot uiting komen.

De commutator bestaat uit een viertal schakelaars waarmee de PSD klemmen op commando van de microcontroller verwisseld kunnen worden teneinde I_1 of I_2 te selecteren. De LED stroom wordt gemoduleerd door de uitgangsspanning met behulp van de schakelaar P_0, zodat het gewenste signaal een a.c. signaal is. Er kan aangetoond worden dat de invloed van

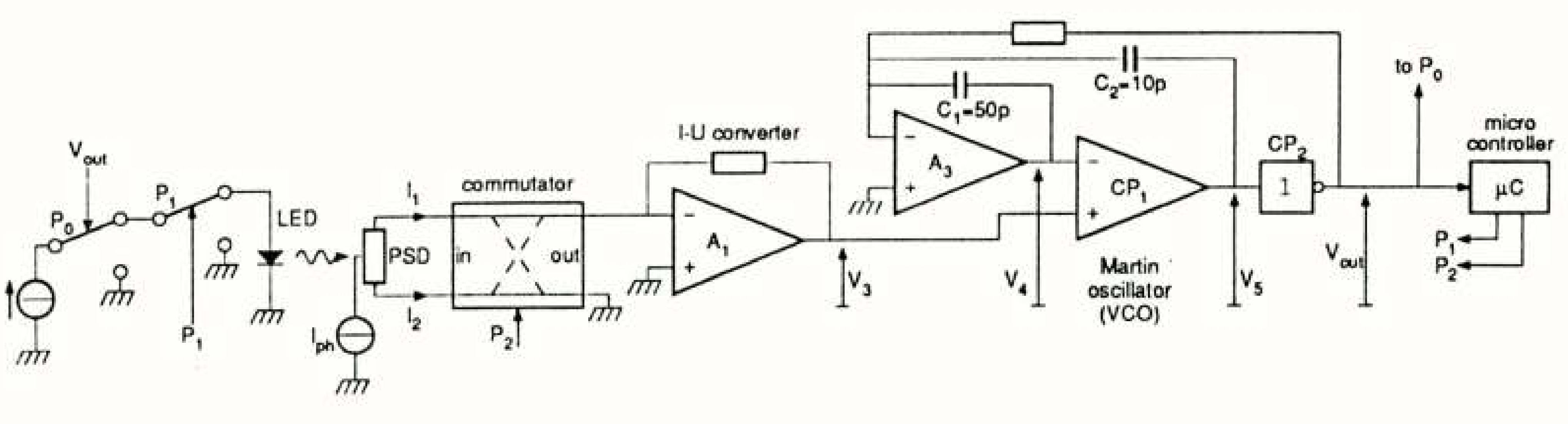


Fig. 11 Blokschema van de pientere positie-opnemer.

(ongewenste) d.c. componenten volledig geëlimineerd wordt.

De te meten stroom wordt geconverteerd in een spanning door de I-U converter. Deze blokvormige spanning vormt het ingangssignaal van de Martin oscillator. Een eigenschap van deze oscillator is dat de periode lineair afhangt van de piek-piek waarde van de stuurspanning V_3 en dus van de PSD stromen. Gelijkspanningscomponenten in de stuurspanning of in de PSD stromen hebben geen enkele invloed op de periode [4], hetgeen erg plezierig is omdat lekstromen en offset van de versterkers daardoor niet van invloed zijn op het uitgangssignaal. Verder blijkt dat het uitgangssignaal zoals gegeven in (6) in hoge mate ongevoelig is voor niet-idealiteiten zoals slew-rate, transients en d.c. fouten van de versterkers.

Het uitgangssignaal kan rechtstreeks door de microcontroller worden ingelezen, zonder dat hiervoor extra componenten nodig zijn. Na een zeker aantal N van de perioden (Fig. 12) van het uitgangssignaal worden de schakelaars P_2 en P_1 achtereenvolgens in de alternatieve positie gezet om resp. I_1, I_2 en I_0 te meten.

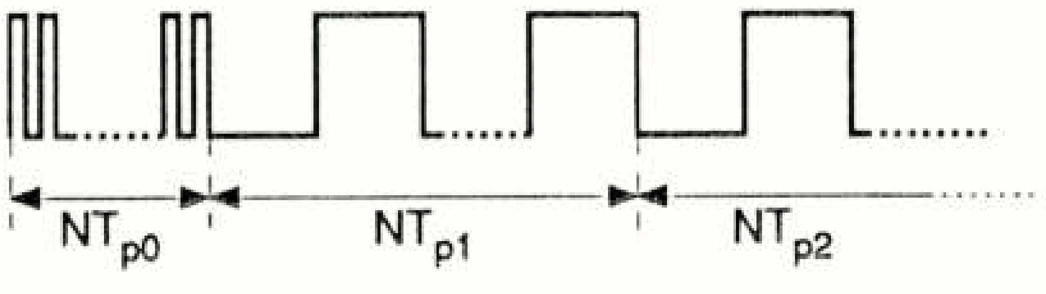


Fig. 12 Het uitgangssignaal van de positie-opnemer.

Zoals uitgelegd in paragraaf 3, betreft de meest belangrijke eigenschap van de VCO de lineariteit. De oscillator is hierop speciaal ontworpen. De onnauwkeurigheid van de verwerkingselektronica blijkt minder dan 10^{-4} te bedragen; hetgeen beduidend minder is dan die van de PSD zelf. Het feit dat hiervoor geen dure precisie-elementen nodig zijn en zelfs implementatie met goedkope MOS-versterkers mogelijk is, toont aan hoe krachtig het toegepaste concept is.

Enkele van de overige eigenschappen zijn: een stroomverbruik van 3 mA bij voedingsspanningen van ± 5V, een oscillatorfrequentie van 5-10 kHz en een meettijd van 100 ms.

Conclusies

Met smart sensors wordt het mogelijk om op zeer eenvoudige wijze een computer met de buitenwereld te verbinden. Aan de andere kant worden de sensoreigenschappen sterk verbeterd door gebruik te maken van de kracht van de computer, en met name door een verscheidenheid aan fysische gegevens te verzamelen en op basis daarvan de te meten grootheid te bepalen. Verdere verbeteringen worden bereikt door met de computer de optimale instelling van de sensoren te berekenen en besturingssignalen naar de pientere sensor te zenden.

De combinatie van een pientere sensor met een microcontroller is bijzonder geslaagd, omdat voor een zeer lage prijs een zeer nauwkeurig meetsysteem wordt verkregen. De snelheid van dergelijke systemen kan orden van grootte hoger zijn dan die van dure conventionele systemen, bij een vergelijkbare nauwkeurigheid.

In dit verhaal wordt een aantal concepten besproken waarmee het mogelijk is om met onnauwkeurige en goedkope onderdelen toch een hoge precisie te behalen. Deze concepten zijn toegepast in een aantal nieuwe pientere sensoren en processoren, waarvan er enkele in dit verhaal zijn besproken.

Referenties

[1] G.C.M. Meijer, R. van Gelder, V. Nooder, J. van Drecht and H. Kerkvliet. "A three-terminal integrated temperature transducer with microcomputer interfacing". Sensors and Actuators, vol. 18 (1989), pp. 195-206.

[2] SMARTEC. Specification sheet SMT160-30. Hellevoetsluis, Nederland, 1991.

[3] G.C.M. Meijer and C.H. Voorwinden. "A novel BIMOS signal processor for Pt 100 temperature sensors with microcontroller interfacing". Sensors and Actuators, vol. 25-27 (1991), pp. 613-620.

[4] J. van Drecht, G.C.M. Meijer and P.C. de Jong. "Concepts for the design of smart sensors and smart signal processors and their application to PSD displacement transducers". Proc. Transducers '91 conference, San Francisco, U.S.A., pp. 475-478.

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

SENSOREN MET DIGITALE UITGANG
Waarom en hoe?

Ir. F.R. Riedijk
Elektronische Instrumentatie
Technische Universiteit Delft

Samenvatting

Een doorbraak in het automatisch regelen van processen kan slechts gerealiseerd worden met behulp van de inzet van sensoren op grote schaal. Grootschalige toepassing ondervindt echter vertraging vanwege gebrekkige communicatiemethodes en niet ideale karakteristieken van het meerendeel der sensoren. Elektronica kan deze gebreken wegnemen. Door de sensor te voorzien van een busuitgang en een voor fouten gecompenseerde karakteristiek is hij veel gemakkelijker in systemen in te passen. Zo ontstaat de "ideale" sensor, ook wel smart sensor genoemd. Moderne silicium sensoren bieden de mogelijkheid tot integratie van genoemde elektronica op de sensor chip. Behalve analoge signaalbewerkingseenheden en een bus controller is ook A/D omzetter voor zo'n smart sensor nodig. De toepasbaarheid van veel A/D omzettings principes is klein vanwege de zeer specifieke eisen, die combinatie van zovele functies op een enkele chip met zich mee brengt. Typerende beperkingen zijn nauwkeurigheid der componenten, chip oppervlak en digitale overspraak. Omzetters gebaseerd op het sigma delta principe zijn echter wel in overeenstemming met de genoemde beperkingen. Deze omzetters zijn niet alleen zeer geschikt als standaardblok, maar laten zich ook zeer eenvoudig aan speciale eisen aanpassen.

---

1. Enorme groei sensoren verwacht

De jaren negentig zullen gekenmerkt worden door een explosieve groei in het gebruik van sensoren. [1] Geen enkel technisch hoogwaardig produkt kan aan deze ontwikkeling ontkomen. Deze trend is een logisch gevolg van de opbouw van elk geautomatiseerd proces. Of dit nu de besturing van een vliegtuig of de tracking van een compact disk speler betreft, een geautomatiseerde proces regeling bestaat steeds uit drie essentiële onderdelen, de actuator, de computer en de sensor. Beide eerstgenoemde onderdelen hebben een enorme ontwikkeling in prijs/prestatie verhouding doorgemaakt en worden volop toegepast in proces regelingen. Een soortgelijke ontwikkeling op het gebied van sensoren heeft echter nog niet plaatsgevonden. Het gebruik van sensoren loopt logischer wijze achter op wat systeem technisch verantwoord is. De veelgebruikte methode om dit gemis aan sensoren op te vangen door de voortschrijdende vervolmaking van de twee aanwezige schakels wordt steeds minder efficiënt. Deze schijnbare oplossing is niet te handhaven. Een wezenlijke vooruitgang in automatisering kan slechts gerealiseerd worden met behulp van de inzet van meer en betere sensoren .[2]

2. Beperkte toepasbaarheid huidige sensor

Er zijn een tweetal fundamentele beperkingen die de inzet van meerdere sensoren tot nu toe hebben weten te vertragen.

Allereerst is de communicatie tussen sensor en verwerkingseenheid niet geschikt is voor grotere hoeveelheden sensoren. De traditionele wijze van communicatie is gebaseerd op één draad per sensor. Dit is niet alleen een weinig effectieve methode, maar biedt de systeem ontwerper bovendien niet die flexibiliteit die nodig is voor het inpassen van nieuwe sensoren.

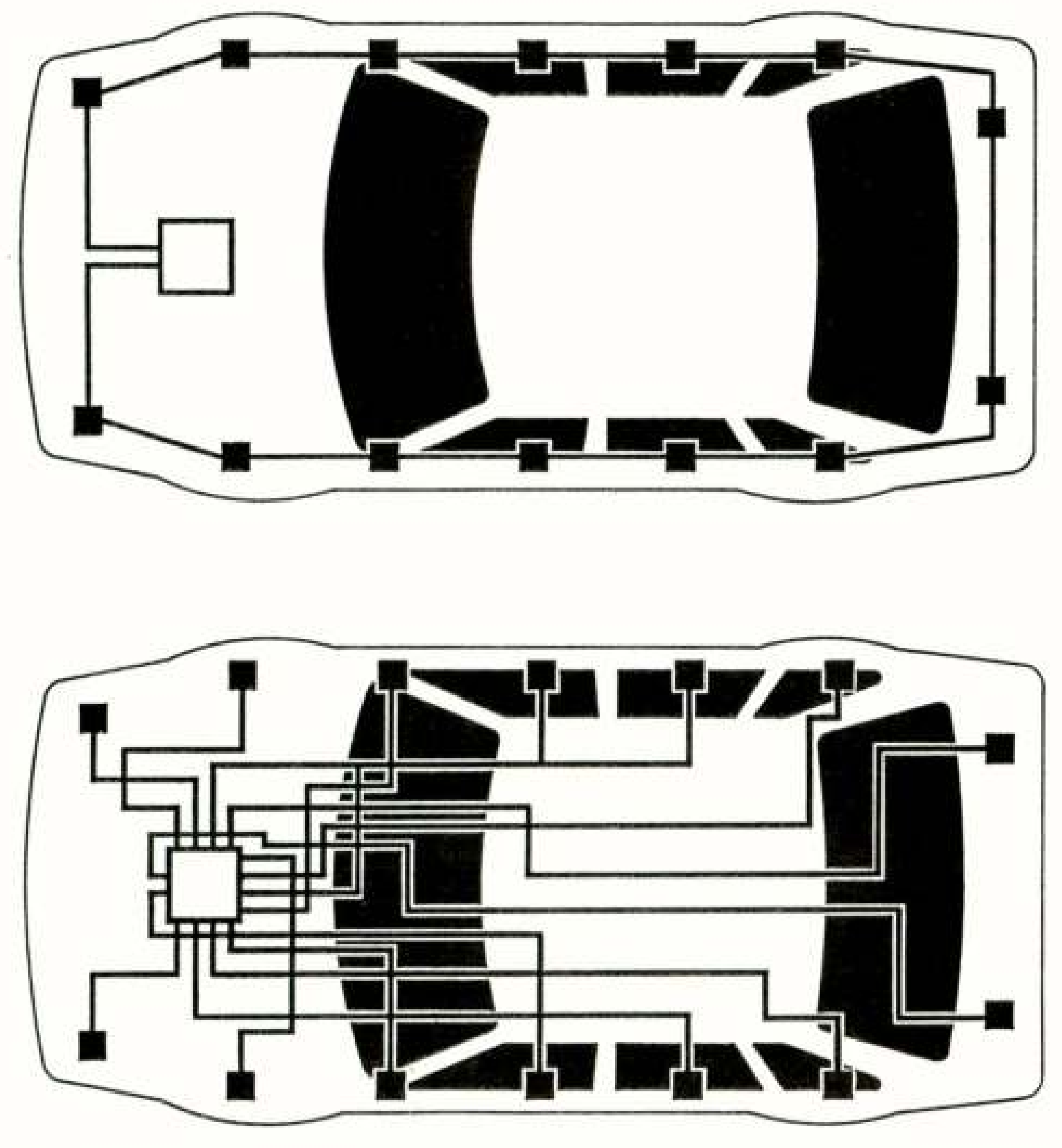
Tevens is de systeem ontwerper niet of nauwelijks op de hoogte van de fysica van sensoren, maar wordt hij wel steeds lastig gevallen met datasheets betreffende de niet lineariteit, drift en temperatuursgevoeligheid van de sensor. De neiging van veel systeem ontwerpers om steeds naar dezelfde, vertrouwde sensor terug te grijpen is daarom begrijpelijk. Tijd om een nieuwe en betere sensor tot in de details te leren kennen is er niet.

2.1 Treffende communicatiestrategieën

De communicatie problemen blijven niet onopgemerkt. Binnen de verschillende toepassingsgebieden hebben diverse instanties de handen ineen geslagen in een poging tot definitie van nieuwe communicatiestandaarden.

Een aansprekend voorbeeld van verouderde communicatiemethodes is de personenwagen. De enorme hoeveelheid bekabeling gebundeld tot grote kabeltrossen benadrukt de problematiek. Gezien het feit dat het aantal sensoren in de auto de komende jaren zal verviervoudigen en dat op langere termijn meer dan honderd sensoren zullen worden toegepast is een geavanceerde manier van communicatie onontkoombaar. Autofabrikanten en hun toeleveranciers onderschrijven dit en zoeken naar standaardisatie van een betere communicatiemethode. Een veelbelovende standaard is de Controller Area Network (CAN). Besturing elementen voor deze bus zijn reeds in de handel. De enorme tegenstelling tussen de traditionele en de nieuwe methode komt goed tot uitdrukking in Figuur 1. De auto industrie is uiteraard niet de enige die deze problemen te lijf gaat. Al zo'n 10 jaar geleden introduceerde Philips de Inter IC (I^2C) bus voor interconnectie tussen diverse elektronische componenten in consumenten produkten. Een ruim assortiment aan bus compatibele componenten is reeds opgebouwd. Deze bus kan zich verheugen in toenemende belangstelling. Voor toepassingen in en om het huis wordt gedacht aan de Domestical Digital Bus (D^2B). De afgelopen jaren is veel aandacht besteed aan de definitie van de Fieldbus, die vooral in de industrie zal worden toegepast. Diverse proefcomplexen zijn reeds met deze bus gerealiseerd.

Het zal een ieder duidelijk zijn dat de gedachte om met een bussysteem sensorinformatie te vergaren in elk toepassingsgebied in ontwikkeling is. Dit is niet verwonderlijk omdat de bus een buitengewoon efficiënte manier van informatietransmissie combineert met een bijzonder flexibele structuur. Extra sensoren of andere componenten kunnen zonder meer aan een produkt worden toegevoegd. De buscontroler kan zelfs zo geprogrammeerd worden dat hij de aanwezigheid van een nieuwe sensor voelt en diens informatie dan ook prompt kan gaan gebruiken. Dit maakt het mogelijk om in een bepaald geautomatiseerd proces of produkt later zonder veel moeite modificaties door te voeren.



Figuur 1. De tegenstelling tussen de ster gekoppelde en de bus gekoppelde configuratie.

Voorlopig ziet het er naar uit dat er meerdere bussen zullen ontstaan die steeds op hun toepassingsgebied geoptimaliseerd zullen zijn. Er wordt wel gesproken over een universele sensor en actuator bus, maar deze ontwikkeling staat nog in de kinderschoenen en er kan nog weinig gezegd worden over de kans van slagen. Er is echter weinig twijfel of er ontstaat voor elk toepassingsgebied van sensoren wel een geschikte bus.

2.2 Terreur van de niet ideale sensor

Het tweede probleem van sensoren vindt zijn oorsprong in de fysica van het meten. Aan de basis van iedere sensor staat een natuurkundig omzettingsmechanisme. Een parameter van een gevoelig materiaal wordt beïnvloed door de te meten grootheid. Deze beïnvloeding is veelal zeer gering en niet altijd voldoende selectief waardoor bijvoorbeeld temperatuursgevoeligheid optreedt. De beïnvloeding is vaak niet lineair van aard of verloopt met de tijd. De systeem ontwerper wordt bovendien geconfronteerd met een heel scala aan mogelijke uitgangssignalen, zoals verandering in capaciteits of weerstandswaarde, gemoduleerde of gegenereerde spanningen en stromen, opgewekte lading en willekeurige combinaties hiervan. De systeem ontwerper zou zo veel mogelijk van deze afwijkende eigenschappen van sensoren moeten worden afgeschermd. Een aantal sensoren is momenteel gestandaardiseerd volgens de 4-20 mA en 0-20 V normen, hetgeen al een stap in de goede richting betekent. Deze standaardisatie vraagt echter om een referentiebron in de verwerkingseenheid en laat de systeem ontwerper in de steek wat betreft compensatie voor secondaire effecten, zoals drift en temperatuursgevoeligheid. Deze moeten derhalve in de verwerkingseenheid, zeg een microprocessor, gecorrigeerd worden.

2.3 Geboorte van de smart sensor

Wat de systeem ontwerper goed kan gebruiken is de voor hem ideale sensor met een goed gebufferd, dimensieloos uitgangssignaal en "perfecte karakteristiek". Hij behoeft zich dan slechts zorgen te maken over de inpassing van deze sensor in zijn systeem. Deze praktische denklijnen vinden hun evenbeeld in de meer populair wetenschappelijke benaming "smart sensor". Het moge duidelijk zijn dat het op de markt komen van dergelijke sensoren een enorme vooruitgang zal betekenen in de toepasbaarheid van sensoren.

Vooralsnog bestaan er drie praktische realisatiemethodes voor smart sensoren, alhoewel in de vakliteratuur de benaming smart sensor toch min of meer gereserveerd is voor de laatste twee.

De eerste realisatiemethode maakt gebruik van een interfacekaart met discrete componenten, die zich veelal dicht bij de sensor bevindt. Deze methode is relatief duur en vindt derhalve slechts toepassing in de professionele sector, zoals lucht- en ruimtevaart.

De tweede realisatiemethode gebruikt één of meerdere intelligente geïntegreerde schakelingen die in hybride vorm in de sensor behuizing zijn geplaatst.

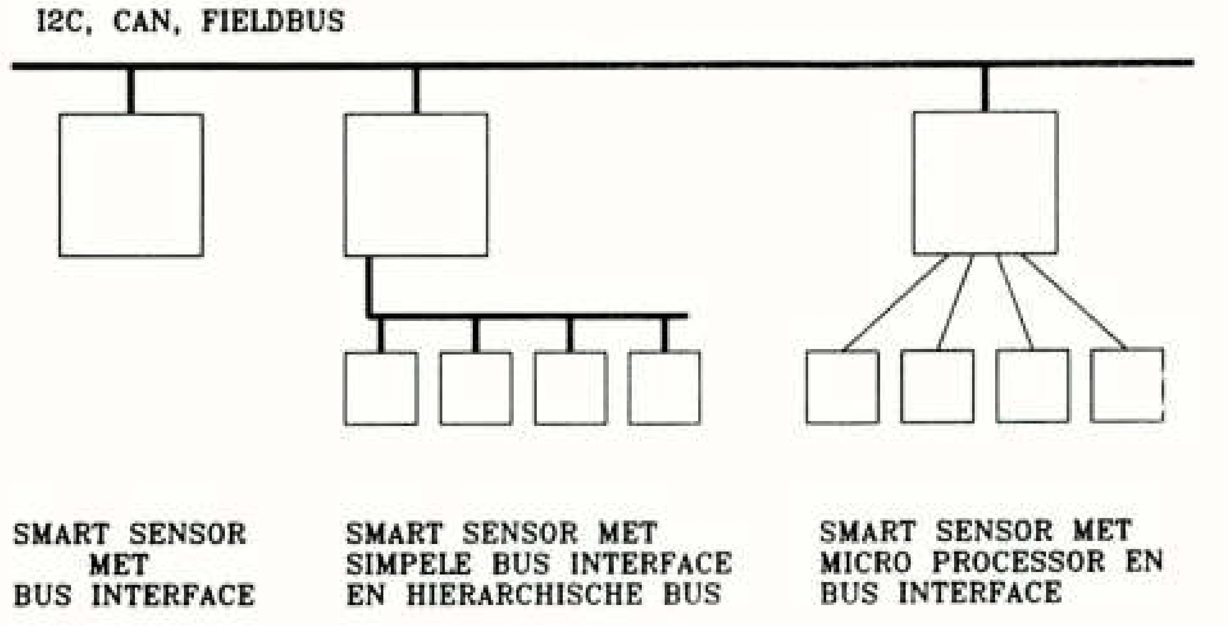
De derde realisatiemethode kan slechts worden toegepast indien de sensor uit silicium vervaardigt is en is derhalve gebonden aan het toepassingsgebied van silicium. Deze methode verenigt sensor en elektronica op een enkele chip, hetgeen buiten een enorme kosten reductie ook een aantal aantrekkelijke nieuwe mogelijkheden biedt. Reeds nu wordt 50% van alle sensoren in silicium gerealiseerd. De één-chip realisatie biedt zodoende zeer interessante perspectieven.

De keuze tussen deze drie realisatie methodes zal afhangen van prijstechnische overwegingen. Gezien de voordelen van de enkele silicium chip realisatie is een geleidelijke overgang van de discrete en hybride realisaties naar deze in de toekomst te verwachten. Voor de systeem ontwerper zal een dergelijke overgang slechts gepaard gaan met een aantrekkelijker prijskaartje.

3. Smart sensoren nemen de bus

De besproken "ideale" of smart sensor lost weliswaar een aantal problemen op maar het communicatie probleem blijft. In principe leent een smart sensor zich zeer goed om ook de communicatieproblemen van sensoren te overwinnen. De toegevoegde elektronica biedt weer de uitkomst. Om een indruk te krijgen welke configuraties in de toekomst te verwachten zijn gaan we er van uit dat de sensor signalen uiteindelijk op een bus terecht moeten komen. Indien de toepassing van een dergelijke bus (nog) niet op zijn plaats is, kan vaak met een bepaald gedeelte van een configuratie worden volstaan. Aangezien steeds meer apparaten tegenwoordig min of meer microprocessor bestuurd zijn, kan deze ook bij sensor systemen als het middelpunt fungeren. Temeer daar microprocessoren vaak uitgerust zijn met busuitgang (I^2C,CAN), digitale ingangspoorten en A/D omzetters al dan niet gecombineerd met analoge multiplexers. De microprocessor kan bovendien een handje helpen bij het idealiseren van de sensor karakteristieken indien dit niet voldoende mogelijk is in de smart sensoren zelf. Uiteraard is de microprocessor zonder meer te vervangen door een andere vorm van intelligentie al naar gelang de systeembehoefte. We kunnen grofweg een drietal mogelijke methodes van systeemopbouw onderscheiden. Hier volgen de beschrijvingen aan de hand van het blokschema van Figuur 2.

Methode één bestaat uit een bus controller (microprocessor), waar één of meer sensoren via een ster netwerk zijn verbonden. De methode gaat uit van smart sensoren, welke hetzij gestandaardiseerde spanningen of semidigitale uitgangsspanningen leveren. De gestandaardiseerde spanningen kunnen met behulp van de multiplexer en de ingebouwde A/D omzetter worden ingelezen. Een probleem hierbij is de beperkte resolutie, veelal 8 bits, en de benodigde referentie voor de A/D omzetter. Door deze omzettingsslag al in de sensor te laten plaatsvinden worden deze problemen grotendeels opgelost. Vaak wordt het analoge sensorsignaal omgezet in een duty-cycle of frequentie. Deze signalen kunnen op een digitale ingangspoort worden aangesloten, waarna de periodes eenvoudig kunnen worden



Figuur 2. Een drietal configuraties voor communicatie tussen een bus en een smart sensor.

gemeten. Een nadeel van dit soort signalen is hun gevoeligheid voor met name digitale overspraak. Deze storingen kunnen via phase-lock effecten de duty-cycle of frequentie tot veelvouden van de microprocessor klokfrequentie maken. Dit leidt tot systematische kwantisatiefouten. Ten einde deze effecten te voorkomen zal de (gemeenschappelijke) voeding uitermate goed gestabiliseerd en ontstoord moeten worden, hetgeen een minder prettige complicatie is. Smart sensoren, geschikt voor deze configuratie beginnen op de markt te verschijnen. Stromingssensoren met duty-cycle output en intelligente temperatuursensoren met graden Celcius uitlezing en duty-cycle output zijn voorbeelden hiervan.

Methode twee bestaat uit een hiërarchische bus waarbij de microprocessor gebruikt wordt om de vertaalslag te maken tussen beide busstrukturen en de besturing van het laagste niveau voor zijn rekening moet nemen. Een voordeel van deze aanpak is dat al op zeer laag niveau de voordelen van een bus kunnen worden uitgebuit, nl. goeie communicatie en enorme flexibiliteit. De lokale bus kan zeer eenvoudig van structuur gekozen worden, hetgeen een ontlasting betekent voor de individuele interface elektronica. Het gebruik van een bus betekent wel dat de smart sensor een digitaal uitgangssignaal moet verschaffen.

Methode drie gaat uit van de complete smart sensor die direct aan een hoog niveau bus is verbonden. De hoeveelheid benodigde elektronica is aanzienlijk, voor het vervullen van interface en compensatie taken. In eerste instantie zal een enkele chip realisatie hierdoor niet aan de orde zijn.

Het voordeel van deze opzet is dat een keuze voor één van de drie niet bindend is. De methodes zijn namelijk coëxcistent. Voor de bus op het hoogste niveau is er geen verschil waardoor in één systeem de methodes door elkaar gebruikt kunnen worden.

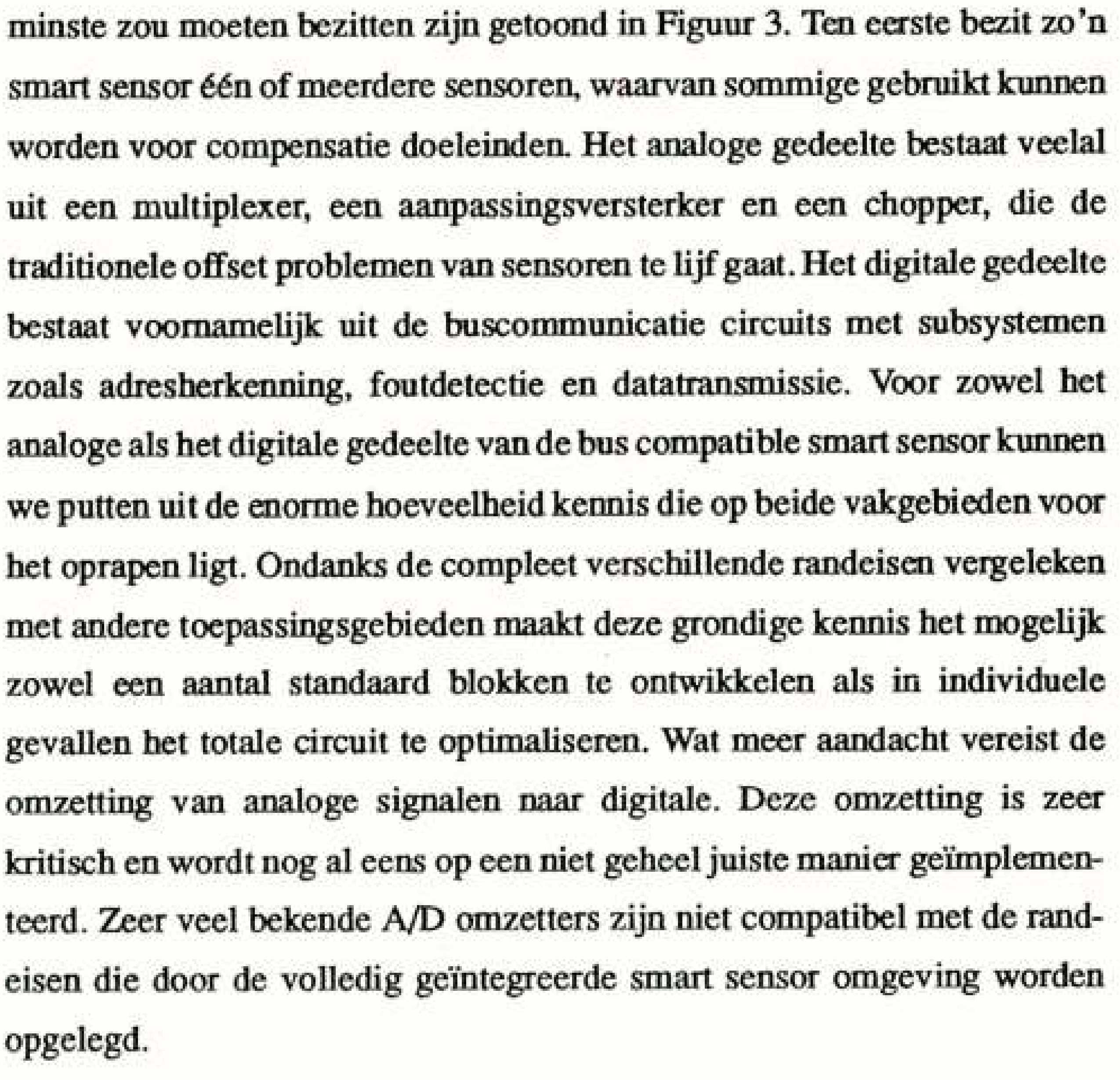
Op lokaal niveau worden de verschillen wel voelbaar. Het ligt voor de hand dat methode één het eerst tot ontwikkeling zal komen. Ongetwijfeld zal de toch wat traditioneel aandoende wijze van communicatie de systeem ontwerper aanspreken. Bovendien zijn de eerste bruikbare smart sensoren al in de handel. Toch is een dergelijke configuratie slechts levensvatbaar met een beperkt aantal sensoren. De wijze van communicatie vertoont dezelfde neiging tot wildgroei als die in de personenwagen. Voor een wat groter aantal sensoren of steeds uitbreidend systeem is men derhalve beter af met methode twee.

Een overgang tussen methode één en twee leidt systeemtechnisch niet tot problemen. De microprocessor is flexibel genoeg en kan opnieuw worden geprogrammeerd. De bedrading is evenmin een probleem. De smart sensoren moeten echter in de revisie. In veel gevallen is het toevoegen van een standaard bus interface blok onvoldoende en moet de totale elektronische structuur worden herzien vanwege de toch wel verschillende randeisen voor beide methodes. Voor het ontwerpen van smart sensoren kost het weinig extra moeite de randeisen van methode twee te hanteren, waarbij gestripte versies prima in de eerste methode kunnen functioneren. Op deze wijze krijgt de systeem ontwerper een extra flexibiliteit in zijn systeemkeuze.

4. Geïntegreerde bus compatibele smart sensoren

De vakgroep Elektronische Instrumentatie van de Technische Universiteit Delft heeft in de loop der jaren veel expertise opgebouwd op het gebied van de geïntegreerde silicium sensoren. De stap naar volledig geïntegreerde smart sensoren is derhalve zeer aantrekkelijk gebleken. Een speerpunt is de ontwikkeling van sensoren die met een bus kunnen communiceren, bij voorkeur via de zojuist besproken tweede methode.

De elektronische functies die een bus georiënteerde smart sensor ten minste zou moeten bezitten zijn getoond in Figuur 3. Ten eerste bezit zo'n smart sensor één of meerdere sensoren, waarvan sommige gebruikt kunnen worden voor compensatie doeleinden. Het analoge gedeelte bestaat veelal uit een multiplexer, een aanpassingsversterker en een chopper, die de traditionele offset problemen van sensoren te lijf gaat. Het digitale gedeelte bestaat voornamelijk uit de buscommunicatie circuits met subsystemen zoals adresherkenning, foutdetectie en datatransmissie. Voor zowel het analoge als het digitale gedeelte van de bus compatible smart sensor kunnen we putten uit de enorme hoeveelheid kennis die op beide vakgebieden voor het oprapen ligt. Ondanks de compleet verschillende randeisen vergeleken met andere toepassingsgebieden maakt deze grondige kennis het mogelijk zowel een aantal standaard blokken te ontwikkelen als in individuele gevallen het totale circuit te optimaliseren. Wat meer aandacht vereist de omzetting van analoge signalen naar digitale. Deze omzetting is zeer kritisch en wordt nog al eens op een niet geheel juiste manier geïmplementeerd. Zeer veel bekende A/D omzetters zijn niet compatibel met de randeisen die door de volledig geïntegreerde smart sensor omgeving worden opgelegd.



Figuur 3. De functies van een geïntegreerde smart sensor.

Om een indruk te geven voor welke problemen we staan, worden de vier belangrijkste randeisen hier kort behandeld:

1. Het streven naar een enkele chip realisatie brengt uiteraard met zich mee dat de ruimte voor de individuele elektronische functies beperkt is. Eenvoudige elektronische oplossingen verdienen derhalve de voorkeur boven complexe realisaties. Afnemende afmetingen van elektronica in het algemeen zal de mogelijkheden van de één chip oplossing alleen maar groter maken.
2. De samenvoeging van meerdere specifieke functies op één chip, denk hier aan sensor, analoog en digitaal, heeft uiteindelijk tot gevolg dat geïntegreerde componenten minder nauwkeurig zullen zijn. Voor sensoren zijn veelal extra proces stappen nodig, al dan niet in combinatie

met extra temperatuurs stappen, die onvermijdelijk afbreuk doen aan de nauwkeurigheid van de geoptimaliseerde componenten in het standaard proces. Zelfs een compromis wat betreft het gebruikte integratie proces is soms niet te vermijden. De elektronische circuits moeten proces onafhankelijk worden ontworpen.

3. Digitale signalen spreken via ladingsinjectie over op de analoge signalen. Afscherming is nauwelijks mogelijk. Ontstoring van de voeding is geen remedie meer, omdat de storingen via het substraat alle elektronische componenten kunnen bereiken. Veelal wordt een symmetrische layout techniek gebruikt om overspraak te balanceren. Bij smart sensoren kan een dusdanige techniek bij uitzondering toegepast worden. Sensor structuren zijn vaak groot en asymmetrisch waardoor ze gevoelig blijven voor overspraak. Ook de analoge structuren kunnen onvoldoende beschermd worden omdat dit extra chip oppervlakte zou vereisen. Het ontwerp moet dus bestand zijn tegen digitale storingen.
4. De integratie van elektronische schakelingen bij sensoren moet in veel gevallen zonder meer als routineklus gezien worden. Een bibliotheek aan standaard blokken maakt het mogelijk een geïntegreerde sensor efficiënt te voorzien van de benodigde intelligente elektronica. Een dusdanige aanpak leidt echter zelden tot optimale circuits. De specifieke combinatie van sensor en elektronica op een chip kan in veel individuele gevallen worden aangegrepen ter verbetering van het totale circuit. Dit betekent dat de toegepaste elektronica voldoende aanpasbaar moet zijn aan deze speciale situaties. We zoeken dus naar elektronica die zowel standaard toepasbaar als flexibel is.

5. Speurtocht naar geschikte A/D omzetter

Gezocht wordt naar een A/D omzetter die voor een groot scala van sensoren geschikt is en zodoende redelijkerwijs als standaard blok kan worden toegepast. Voldoende flexibiliteit kan als laatste criterium gehanteerd worden.

Gezien de beperkte nauwkeurigheid van de meeste sensoren nemen we aan dat 12-14 bits resolutie voldoende is. In geval van extreem grote dynamiek in de signalen van de sensor, waarbij de genoemde resolutie niet meer toereikend is om het bereik af te dekken, wordt signaal compressie toegepast ten einde nauwkeurigheid en resolutie beter op elkaar af te stemmen.

Veel sensorsignalen variëren slechts langzaam. A/D omzetters met een omzettingstijd van enkele milliseconden zijn voor het merendeel toereikend.

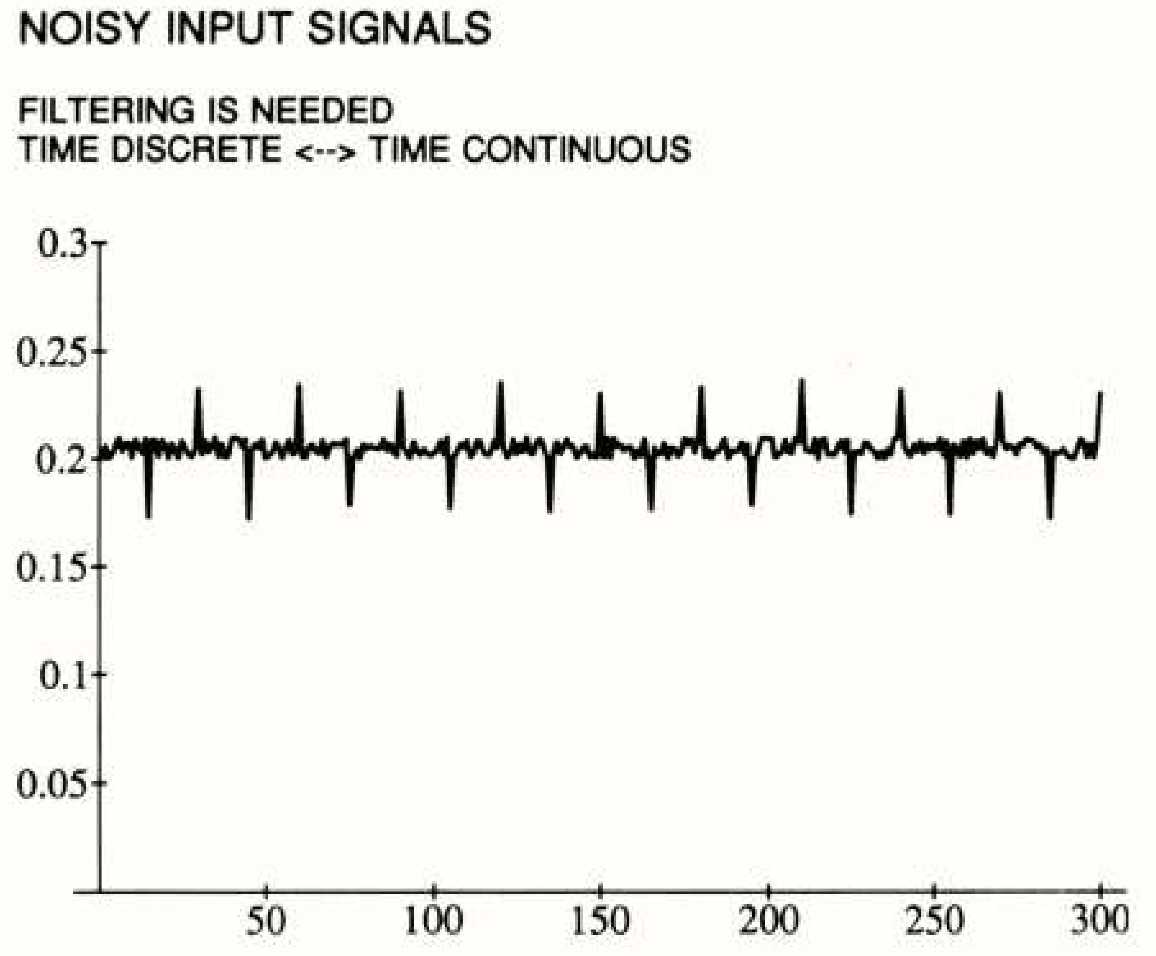
De vier besproken randeisen vormen een leidraad bij een speurtocht door het bos van de A/D omzetters. Op zoek naar een geschikte omzetter zullen we de methode van eliminatie hanteren.

Randeis 1, die van de beperkte chipruimte, beperkt de afmetingen en complexiteit van de A/D omzetters. Hierdoor is het vrijwel onmogelijk om bijvoorbeeld parallelle A/D omzetters te gebruiken wegens de enorme hoeveelheid vereiste componenten.

Randeis 2, die van de relatief slechte componenten, laat het gebruik van omzetters die direct afhankelijk zijn van component toleranties niet toe. Het gevolg is dat omzetters, die ladings herverdeling of ladder netwerken gebruiken als weegfactoren voor hun bits, beperkt zijn tot de tolerantie van respectievelijk de geïntegreerde capaciteit en weerstanden. Deze is in het gunstigste geval slechts 0.1%, d.w.z. 10 bits lineair, terwijl we eigenlijk op zoek zijn naar 12-14 bits lineariteit. De enige juiste conclusie is dat dit soort omzetters niet de eerste keus zou hebben tenzij een ingewikkelde compensatieslag door de microprocessor mogelijk is, hetgeen we uiteraard voor zoveel mogelijk sensoren willen vermijden.

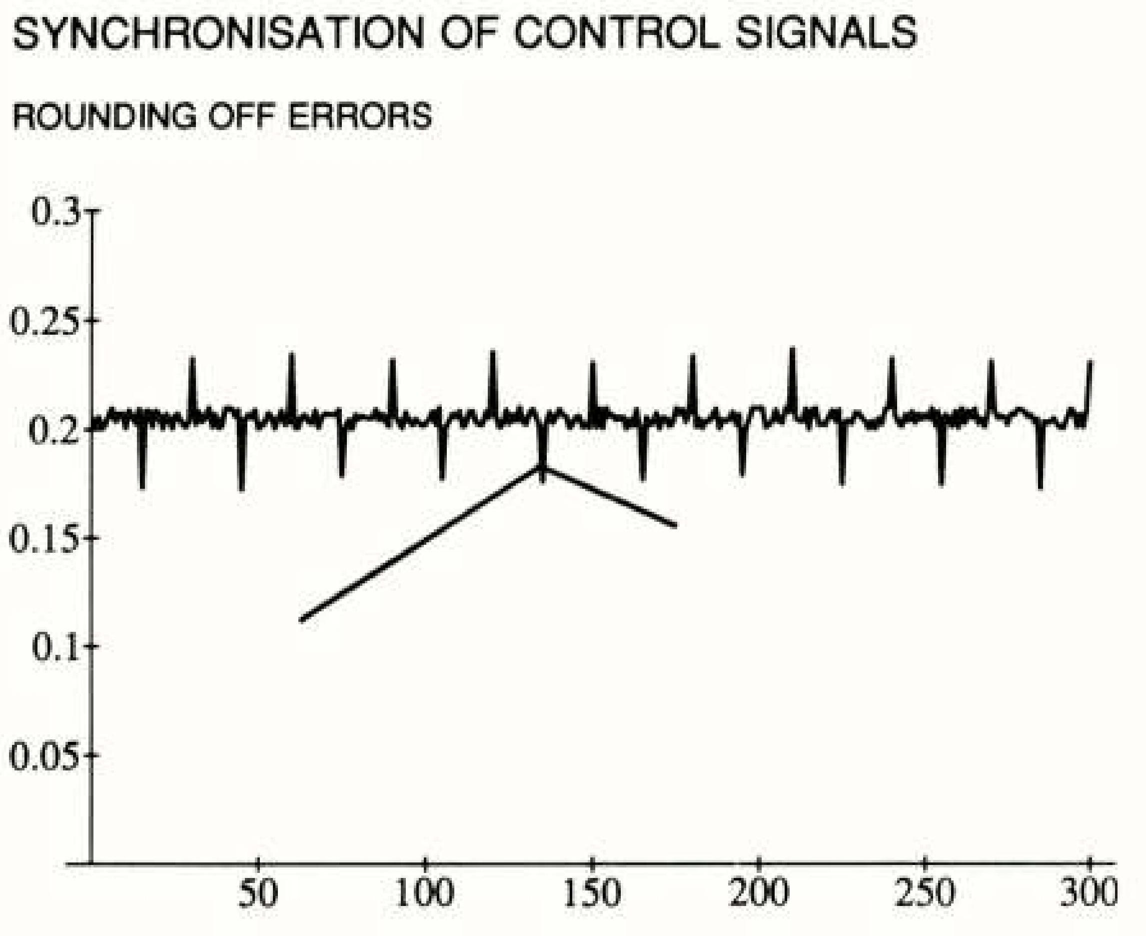
Randeis 3, die van de digitale storingen moeten we uitsplitsen in een tweetal substoringen, namelijk verruiste ingangssignalen voor de A/D omzetter en synchronisatie van controlesignalen gebruikt in de A/D omzetter zelf. Deze verschijnselen hebben uiteraard wel enige uitleg nodig zowel wat betreft oorzaak als gevolg voor de kwantisatieprocessen.

De ingangssignalen voor de A/D omzetters zijn verruist. Dit is geen gewone ruis, maar een ruis met een periodiek spectrum, zoals getoond is in Figuur 4a. De normale manier om van hoogfrequente ruis af te komen is d.m.v. filtering. De periodiciteit vereist echter enige zorg bij het filteren. Voor tijdscontinue filtering is periodiciteit geen probleem, aangezien slechts het frequentie spectrum van belang is. Tijdsdiscrete filtering past echter in essentie bemonstering van het signaal toe. Indien gewerkt wordt met een vaste bemonsteringsfrequentie, moet er gevreesd worden dat er enige correlatie tussen het bemonsteren en de periodieke ruis of spikes zal zijn waardoor de bemonsterde waarde niet altijd correct zal zijn. Voor tijdsdiscrete methodes, zoals switched capacitor, moet hier absoluut rekening mee gehouden worden. Er zijn weliswaar technieken bekend, die deze hoogfrequent storingen redelijk onderdrukken. Bijvoorbeeld het nemen van twee bemonsteringen snel na elkaar. Er dient dan in elk geval wat concreet bekend te zijn over de structuur van de ruis. De onderdrukking van digitale overspraak en ruis in het ingangssignaal is minder kritisch met behulp van tijdscontinue methodes dan met tijdsdiscrete. Hierdoor zou een tijdscontinue opbouw van de omzetter voordelen kunnen bieden.



Figuur 4a. Digitale overspraak heeft verruiste (sensor)signalen tot gevolg. De ruis heeft een periodiek karakter.

Het verschijnsel van synchronisatie van controlesignalen is al eens eerder aan de orde gekomen bij de opwekking van semi-digitale signalen, zoals frequentie en duty-cycle, op een smart sensor. Zoals in Figuur 4b te zien is heeft de opwekking van deze tijdssignalen met behulp van een comparator de neiging tot synchronisatie met een interfererende klok. In het omslaggebied is de gevoeligheid voor overspraak uitermate groot. Wanneer zo'n tijdssignaal hierna door de microprocessor wordt gekwantiseerd, voldoet men niet meer aan de eis van stochastische onafhankelijkheid tussen signaal en kwantiserende klok, hetgeen tot systematische afrondfouten leidt. Men kan slechts aan deze verschijnselen ontkomen indien alle controle signalen bij voorbaat gesynchroniseerd met de klok verlopen.

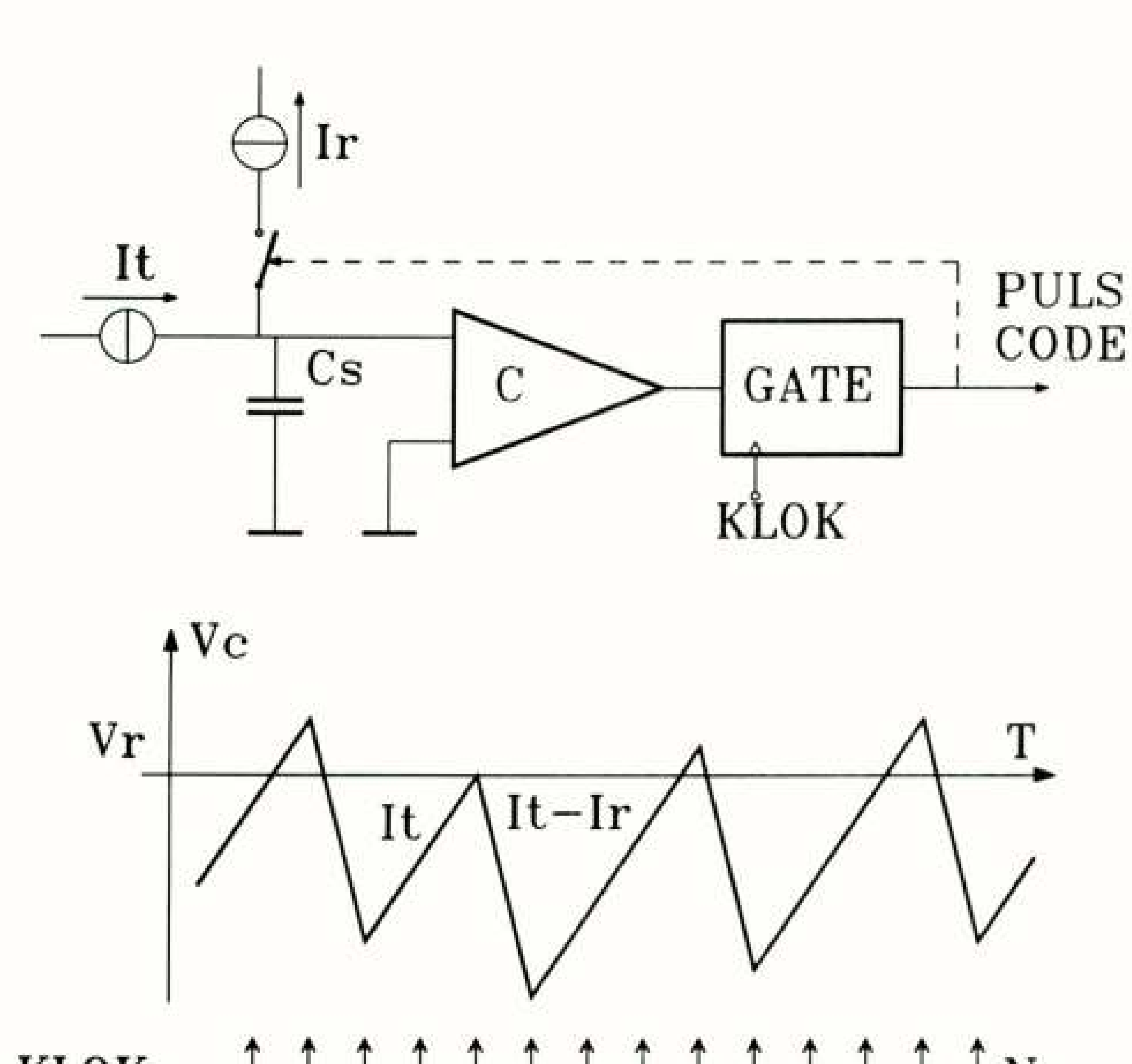


Figuur 4b. Het tijdstip van omschakelen van een comparator wordt gesynchroniseerd door de stoorpieken.

6. Sigma Delta A/D omzetter

Een omzetter die volkomen aan de drie eerst gestelde eisen voldoet is de sigma delta omzetter, die momenteel aan een indrukwekkende opmars bezig is in CD spelers. Zoals de omzetter de nodige voordelen biedt voor audio toepassingen, zo heeft deze ook een aantal eigenschappen die in de instrumentatie van belang zijn. De omzetter is zeer lineair en zijn versterkingsfactor wordt door middel van terugkoppeling zeer eenduidig vastgelegd.

Voor het werkingsprincipe verwijzen we naar Figuur 5, waar de sigma delta omzetter schematisch is weergegeven. Een stroombron die de onbekende ingangsgrootheid representeert laadt tijdscontinue een capaciteit op.



Figuur 5. Het principeschema van de sigma delta A/D omzetter.

Een geklokte comparator kijkt voortdurend of een ingestelde referentiespanning wordt overschreden. Indien dit het geval is wordt gedurende precies één klokperiode een bekende referentiestroombron ingeschakeld om de capaciteit weer te ontladen tot onder de referentiespanning, waarna de gehele cyclus weer opnieuw zal worden doorlopen. In de tijd gezien is hier sprake van het balanceren van lading van een onbekende bron met een bekende bron.

Het is eenvoudig te verklaren dat de verhouding van de totale inschakeltijd van de referentiestoombron met die van de onbekende bron juist de maat is voor de verhouding van beide stroomsterktes.

Doordat de onbekende bron continue loopt en de referentiebron steeds exact één klokperiode ingeschakeld wordt, is het voldoende om de pulsjes te tellen die door het circuit geproduceerd worden. In technische termen wordt dit wel een pulsrate genoemd. Deze pulsrate heeft echter geen vaste frequentie, maar is behept met een zekere kwantisatieruis. Intuïtief laat het zich aan voelen dat hoe meer pulsjes geteld worden, hoe beter deze ruis wordt uitgemiddeld. Langer wachten levert dus een betere schatting op van de frequentie en dus een hogere resolutie.

De converter kan tot op zekere hoogte als volkomen lineair worden beschouwd, omdat de ladingsbalancering ongeacht de sterkte van het ingangssignaal steeds met dezelfde referentiepuls wordt geregeld. Ieder digitaal getal is derhalve een optelling van een aantal malen het laagstwaardige bit. De nauwkeurigheid van de versterkingsfactor is uiteraard wel aan grenzen gebonden. Deze is afhankelijk van de toleranties van componenten, dus maximaal 0.1%. Met behulp van trimmen of microprocessor compensatie kan de nauwkeurigheid weer verbeterd worden. Dit is van geval tot geval nodig.

Een pulsrate is het eenvoudigste digitaal uitgangssignaal. Het bezit unieke communicatie eigenschappen.

Als eerste kunnen we stellen dat de duty-cycle informatie nog steeds aanwezig is, zij het behept met enige kwantisatieruis. Deze eigenschap maakt directe aansluiting op een poort van een microprocessor mogelijk. Bijkomend voordeel van deze configuratie, ten opzichte van de gebruikelijke duty-cycle of frequentie signalen, is dat de controlesignalen gesynchroniseerd zijn, waardoor digitale overspraak geen invloed meer heeft.

Als tweede kunnen we stellen dat een pulsrate zonder problemen op een bus kan worden gezet. Omdat alle verzonden bits volledig gelijkwaardig zijn kan de microprocessor zonder ingewikkelde data verzendingsprotocollen de bits aflezen. Dit in tegenstelling tot echte digitale codes, waar de sensor op een of andere manier duidelijk moet maken hoe zijn laagstwaardige bits te onderscheiden van de hoogstwaardige. Een dusdanige wijze van communicatie benut het data kanaal weliswaar niet optimaal, maar de bus interface op de smart sensor chip blijft uitermate simpel.

Als laatste kan op chip de pulsrate geteld worden en de uiteindelijke digitale code in juiste bit volgorde op de bus gezet worden, hetgeen uiteraard een ingewikkelder busprotocol en bijkomende elektronica vereist.

Al met al is het uitgangssignaal van de sigma delta zeer geschikt voor al de tussenconfiguraties die zullen optreden in de zoektocht naar het protocol voor de optimale communicatie.

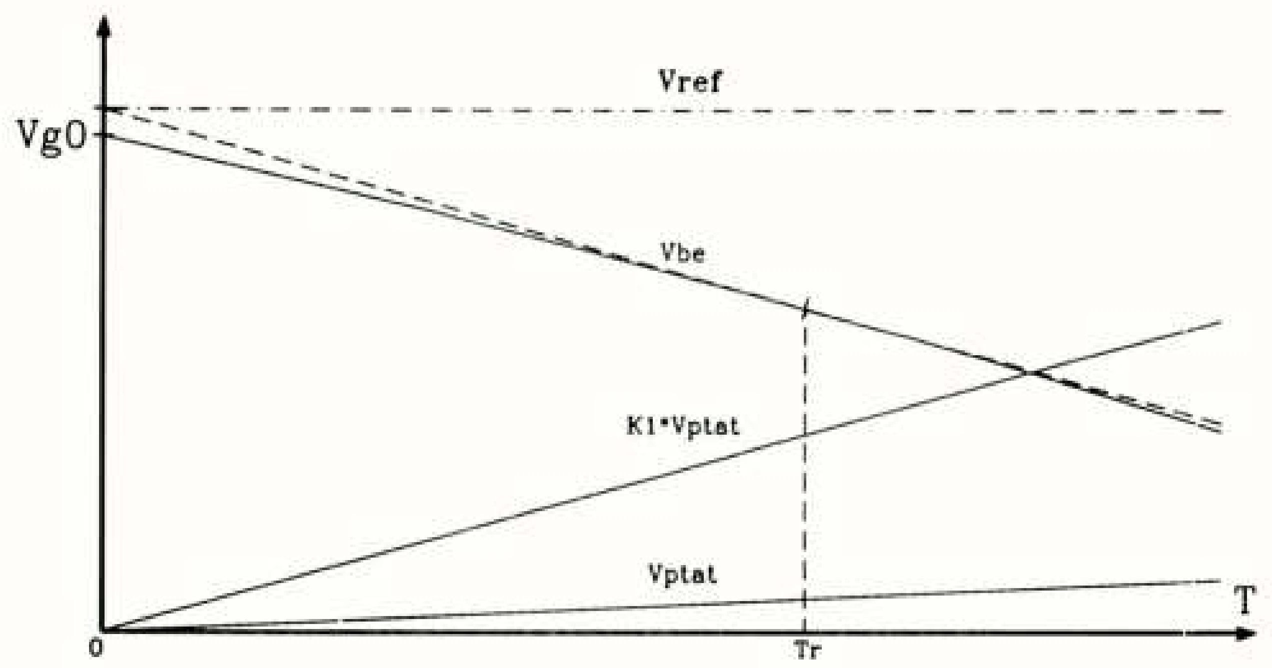
7. Drietal praktische realisaties

We hebben gezien dat de sigma delta als standaard blok zonder meer te implementeren is op een smart sensor. De elektrische configuratie van de sigma delta biedt echter ook nog de nodige mogelijkheden tot creativiteit ten aanzien van de specifieke combinatie van sensor en elektronica. Voor de geïnteresseerde lezer zijn een drietal voorbeelden toegevoegd, die een tipje van de sluier kunnen oplichten wat betreft de mogelijkheden van smart sensoren. Het eerste voorbeeld maakt min of meer gebruik van de sigma delta omzetter als een standaard blok. Bij de laatste twee voorbeelden is de combinatie van elektronica en sensor individueel geoptimaliseerd, hetgeen

tot een dusdanige prestatie verbetering heeft geleid dat patentering aan de orde kwam. Eén aanvraag is reeds gehonoreerd in Europa, de andere loopt nog.

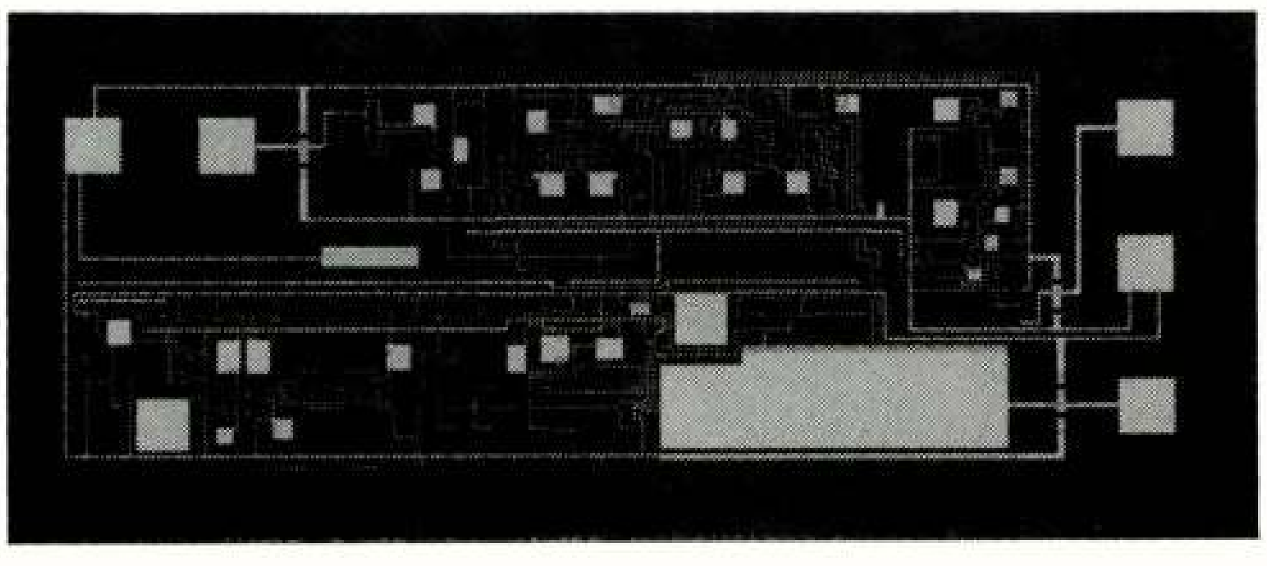
7.1 Absolute temperatuur sensor met digitale output

De absolute temperatuur sensor is in principe gebaseerd op de goed beschreven temperatuur afhankelijkheid van de basis emitter spanning van een bipolaire transistor. De emitter spanning neemt bijna lineair af van een zekere bandgab spanning bij 0K. Een configuratie waar twee bipolaire transistoren op ongelijke emitter stroom dichtheid zijn ingesteld geeft een verschil spanning die evenredig is met de absolute temperatuur. Uit Figuur 6 blijkt dat met behulp van deze twee temperatuurssignalen een temperatuur onafhankelijk referentie signaal gemaakt kan worden. Door nu de spanningen in stromen om te zetten en deze voor de beschreven sigma delta converter te gebruiken kan zeer eenvoudig een puls rate output verkregen worden. [3]



Figuur 6. Met behulp van bipolaire transistor gegenereerde spanningen als functie van de temperatuur.

Het totale geïntegreerde circuit is getoond in Figuur 7. De afmetingen zijn $1x3mm^2$. De vermogensdissipatie blijft beneden 2 mW hetgeen in een standaard behuizing leidt tot een zelf opwarming van 0.1°C. De nauwkeurigheid van het circuit zonder trimming of calibratie is 1-2°C bij een temperatuur bereik van -50°C-125°C. De clockfrequentie van de sigma delta is 200 kHz, hetgeen leidt tot een uitleestijd van 5 ms bij 10 bits resolutie.

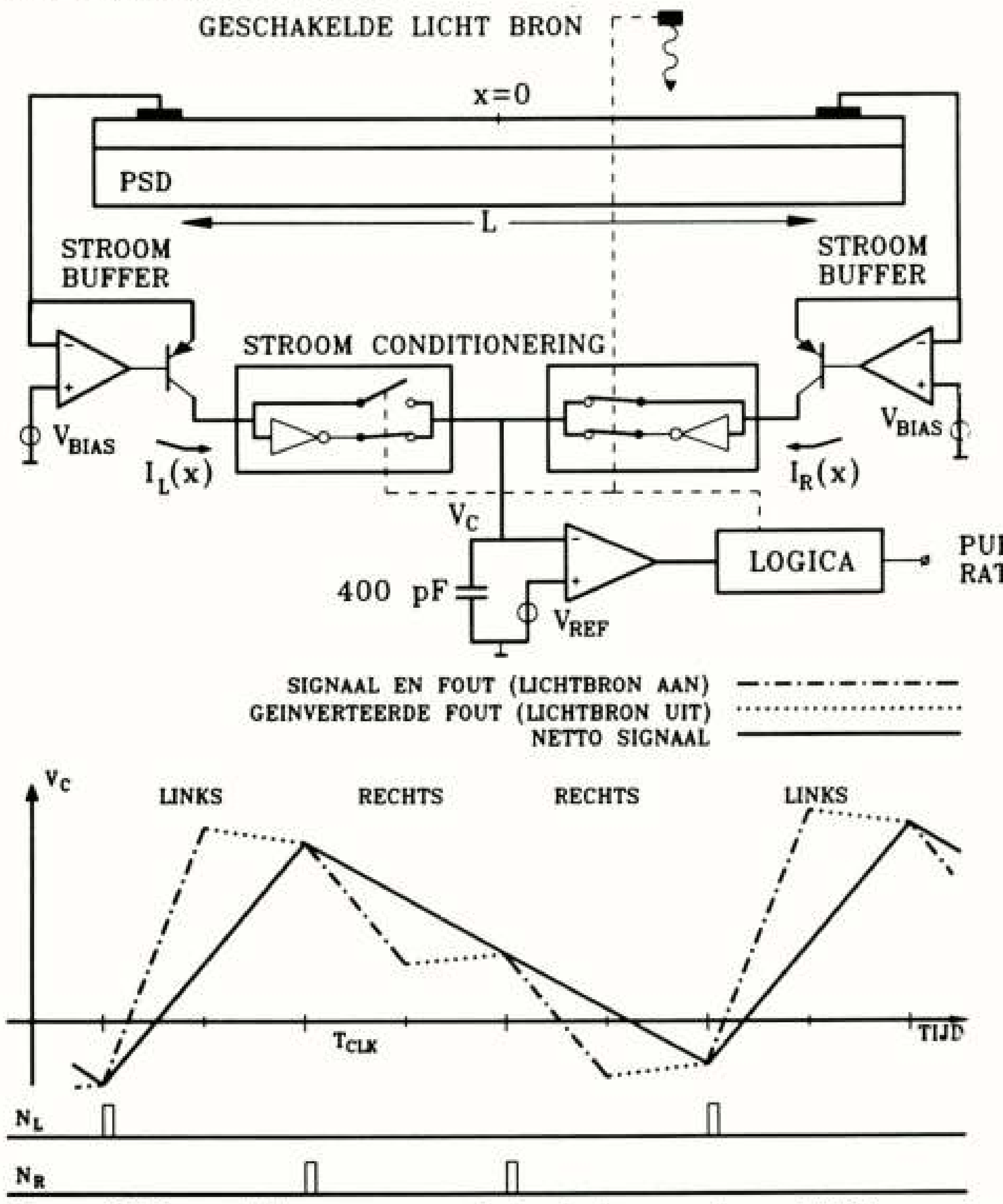


Figuur 7. Microfoto van de geïntegreerde absolute temperatuur sensor met puls rate output. De chip is compatibel met zowel ECL als TTL.

7.2 PSD met digitale output en ingebouwde foutcorrectie

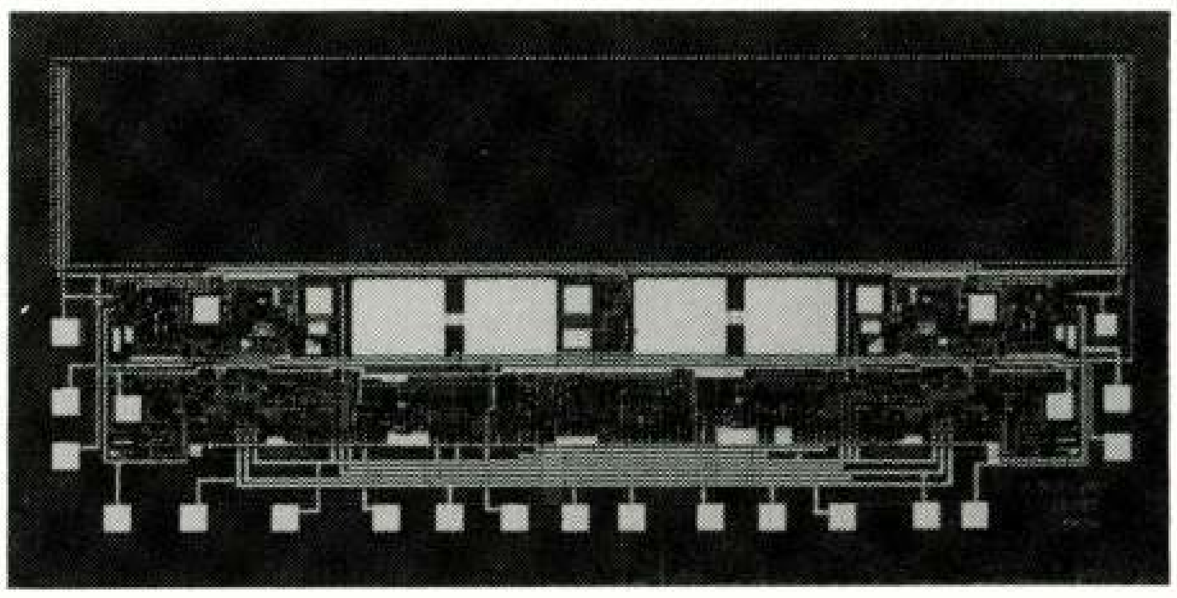
Een lineair Position Sensitive Device (PSD) kan gezien worden als een elektro-optische potentiometer. In principe bestaat de PSD uit een grote lichtgevoelige diode, welke aan twee kanten gecontacteerd is. Het gegenereerde licht verdeelt zich over beide contacten, op zo'n manier dat het zwaartepunt van een licht spot de functie van de loper van de potentiometer heeft. Wanneer een dergelijke structuur dus beschenen wordt met een lichtbron, kan men uit de verhouding van beide stromen eenvoudig de positie afleiden. Een bekend probleem hierbij is de aanwezigheid van verstorend achtergrond licht alsmede de lekstromen van de lichtgevoelige diode en stroomversterkers. Dit probleem wordt meestal aangepakt door de lichtbron te moduleren en aldus te onderscheiden van de statische fouten. Met behulp van synchrone detectie kan het signaal dan weer gereconstrueerd worden. Dit soort technieken vraagt echter een grote hoeveelheid besturingselektronica, waardoor implementatie als smart sensor bemoeilijkt wordt. Het gebruik van de sigma delta converter als A/D omzetter bleek echter de mogelijkheid te verschaffen om in een circuit zowel de relatieve positie, de fout correctie en een digitaal uitgangssignaal te generen. [4]

Aangezien de verhouding van linker en rechter uitgangsstroom van de PSD de relatieve positie weergeeft, kunnen beide positiestromen direct als input voor de sigma delta omzetter worden gebruikt, welke van nature een verhoudingsoperatie levert. Indien de chopfrequentie van de lichtbron het dubbele bedraagt van de klokfrequentie van de sigma delta omzetter, kunnen we in een halve klokperiode eerst het positiesignaal + fout integreren en in de daarop volgende halve periode -fout. Zoals in Figuur 8 getoond wordt levert dit na een volledige klokperiode exact het gewenste signaal op, alle offsetfouten zijn verdwenen. Deze methode van offset compensatie vergt slechts een paar extra schakelaars en kan daardoor eenvoudig als smart sensor gerealiseerd worden.



Figuur 8. De positie sensor met digitaal uitgangssignaal blijft erg simpel dankzij een nieuwe fout correctie methode.

Het systeem is gemaakt in een standaard bipolair proces. De PSD meet $6.5x1.5\ mm^2$, terwijl de gehele smart sensor slechts $6.5x2.5\ mm^2$ in beslag neemt. Figuur 9 toont de totale structuur, waarmee verplaatsingen tot enkele micrometers lineair kunnen worden gemeten. De klokfrequentie is hier 50 kHz gekozen, hetgeen leidt tot een uitleestijd van 20 ms bij 10 bits resolutie. De methode bleek dermate elegant dat momenteel een patentaanvraag lopende is.

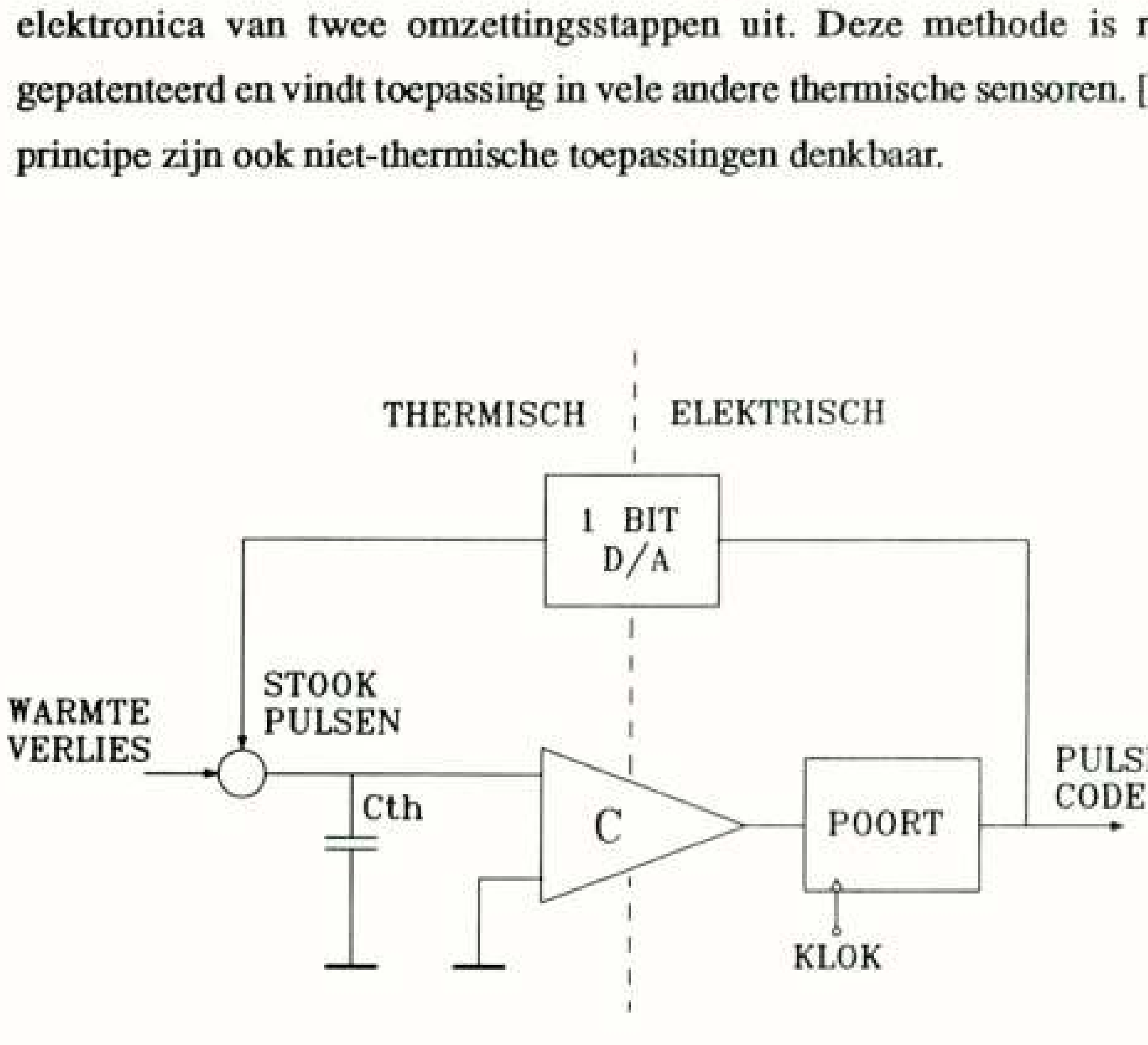


Figuur 9. Microfoto van de geïntegreerde positie sensor. De 6.5 mm lange positie gevoelige diode meet tot op enkele micrometers nauwkeurig.

7.3 Thermische sigma delta voor stromingsmetingen

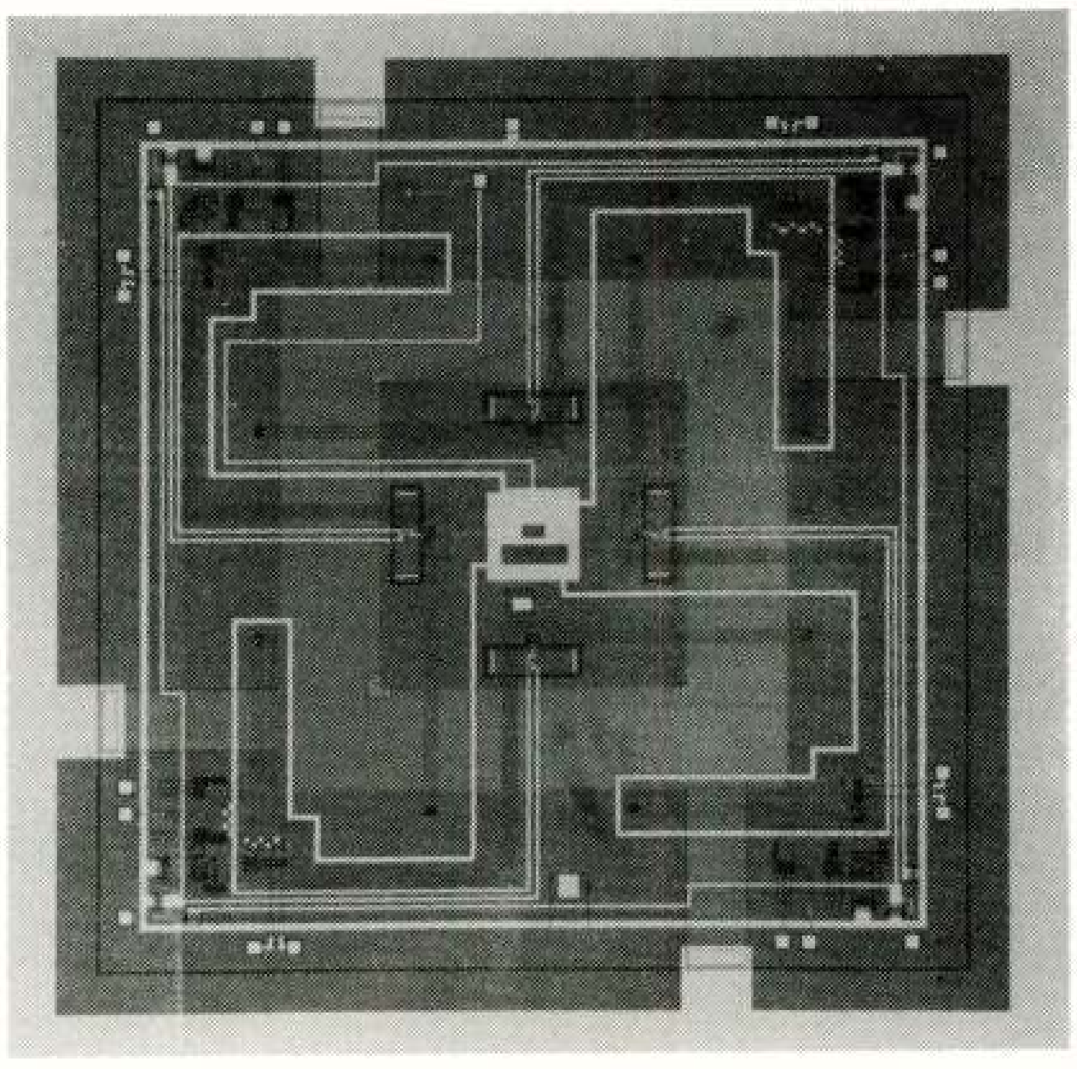
In silicium is al veel onderzoek gedaan naar stromingssensoren gebaseerd op een thermisch principe. De grondslag voor dit soort sensoren is gelegen in de afkoeling van een verwarmd object door de stroming. Bekend is dat de hoeveelheid afgenomen warmte een maat is voor de stromingssnelheid. Indien nu een object op een vaste temperatuur gehouden wordt is het stookvermogen dat daarvoor nodig is, uiteraard gelijk aan het afgegeven vermogen. Gedissipeerd vermogen is op chip uiteraard eenvoudig te meten. Wanneer we nu een dergelijke sensor willen voorzien van een digitale uitgang kunnen we het gemeten stookvermogen geschikt maken als ingangssignaal voor een sigma delta omzetter. De benodigde elektronica bestaat dan uit een interface tussen stookvermogen en sigma delta omzetter en de sigma delta omzetter zelf.

Na enige nadere analyse komt echter een veel elegantere methode naar voren, de thermische sigma delta. Deze omzettingsmethode is in Figuur 10 blokschematisch aangegeven. De temperatuur van het object wordt gecontroleerd door een geklokte comparator, die indien noodzakelijk een stookbron exact een klokperiode inschakelt. Enig nader onderzoek laat zien dat deze methode gebaseerd is op sigma delta principes. Via de elektrisch/thermisch analogie is de elektrische capaciteit vervangen door de warmtecapaciteit van het object en de elektrische comparator door een thermische. Het geheel kan zeer compact worden uitgevoerd en spaart in feite de elektronica van twee omzettingsstappen uit. Deze methode is reeds gepatenteerd en vindt toepassing in vele andere thermische sensoren. [5] In principe zijn ook niet-thermische toepassingen denkbaar.



Figuur 10. De omzetting van een analoog naar een digitaal signaal vindt gedeeltelijk plaats in het thermische domein. We spreken derhalve van een thermische sigma delta omzetter.

Een geïntegreerde stromingsmeter gebaseerd op de thermische sigma delta is getoond in Figuur 11. Ten einde richtingsgevoeligheid te verkrijgen is niet één sigma delta omzetter toegepast, maar zijn een viertal omzetters gebruikt. De afmetingen van de totale sensor bedragen 6x6 mm^2.



Figuur 11. Microfoto van een richtingsgevoelige windsensor gebaseerd op de thermische sigma delta methode.

Terreur ten einde?

In het voorgaande zijn een drietal realisaties gegeven van smart sensoren met digitale uitgang, waaruit duidelijk blijkt dat elektronica en sensor op één chip grote mogelijkheden biedt. De individuele optimalisatie van een smart sensor leidt veelal tot een enorme prestatie verbetering. Indien hiertoe geen tijd, noodzaak of geld is, kan men met behulp van een bibliotheek aan standaard interface blokken flink wat silicium sensoren zonder veel moeite tot smart sensor om bouwen. De potentiële mogelijkheden zijn dan wel niet optimaal gebruikt, maar de smart sensor op zich biedt al voldoende voordelen. Van geval tot geval kan steeds gekeken worden welke aanpak te prefereren is.

Indien de sensorsignalen eenmaal digitaal zijn gemaakt is slechts een standaard busbesturingsblokje voldoende om de smart sensor in staat te stellen met een bus te communiceren. In het overgangsproces naar de busgeoriënteerde communicatie biedt de sigma delta omzetter grote voordelen, omdat het uitgangssignaal in feite voor elke communicatie configuratie te gebruiken is.

Voor een aantal toepassingsgebieden is silicium als sensor materiaal niet te gebruiken. Volledige integratie van smart sensoren is dan uiteraard onmogelijk. De smart sensor elektronica kan dan gebruikt worden in de vorm van hybride signaalbewerkingscircuits. In praktijk kan voor iedere omgeving het smart concept geïmplementeerd worden. Slechts prijstechnische overwegingen kunnen de invoering van een bus dan nog in de weg staan. Naarmate het gemis aan sensoren meer voelbaar wordt zal ook deze laatste barrière geslecht worden.

De toekomstige ontwikkelingen op sensorgebied zullen zowel het vergaren als het verzenden van sensorinformatie veel gedefinieerder maken. De terreur van de niet ideale sensor zal dan ten einde zijn.

Referenties

[1] Berenschot, "Technologieverkenning mechatronicasensoren en -actuatoren", studie in opdracht van ministerie van economische zaken (1990).

[2] J.H. Huijsing, "Geïntegreerde intelligente sensoren, of mist de Nederlandse industrie de automatiseringsboot", Intreerede TU Delft, November 1990.

[3] F.R. Riedijk, "An integrated absolute temperature sensor with digital output", Proceedings Transducer 91, July 1991, pp. 479-482.

[4] T. Smith, "An integrated linear position detector with digital output", Proceedings Transducer 91, July 1991, pp. 719-722.

[5] J.H. Huijsing en F.R. Riedijk, "Geïntegreerde halfgeleider-schakeling voor thermische metingen", Nederlands Patent nr. 8901602.

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

GEINTEGREERD OPTISCHE SENSOREN

Dr. Paul V. Lambeck
MESA-Research Instituut
Universiteit Twente

Integrated optical sensors are introduced. After a short treatment of the waveguiding phenomenon, some illustrative examples of these sensors are presented namely: a Michelson interferometer for measuring displacement, a general-purpose Mach Zehnder interferometer, a pick-up device for optical memories and a Surface Plasmon Resonance based chemical sensor. The strong points of integrated optical sensors are emphasized.

1. Inleiding

Optische meettechnieken zijn vaak uiterst gevoelig, maar ze vereis(t)en meestal volumineuze en kostbare apparatuur. Met de komst van fibers en planaire lichtgeleiders, is dat anders geworden. Hiermee wordt het mogelijk een ingewikkelde lichtweg simpel vast te leggen zonder ook maar één spiegel te gebruiken. Daarnaast kan vrij eenvoudig worden gemanipuleerd met de manier waarop het licht zich binnen lichtgeleiderstructuren voortplant. Dit geeft de mogelijkheid in deze structuren allerlei optische functies te implementeren (waaronder sensing functies) waardoor complete optische systemen van erg kleine afmetingen gemaakt kunnen worden.

Voor sensorprincipes, die met simpele lichtgeleiderstructuren kunnen volstaan is de fiber uitvoering ideaal: de fiber is goedkoop en kan niet alleen voor "sensing" maar ook voor het transport van het licht naar en van de sensor worden ingezet. Voor sensorprincipes waarvoor een groot aantal optische basisfuncties, zoals bundel splitsers, koppelaars en golflengtefilters of speciale materialen nodig zijn is de geintegreerd optische uitvoeringsvorm vaak aantrekkelijker.

Nog maar weinig geïntegreerd optische sensoren zijn commercieel verkrijgbaar. Gedeeltelijk komt dit, omdat het onderzoeksgebied nog nieuw is. De hoofdoorzaak ligt echter in de beperkingen die de technologie de ontwerper oplegt. Omdat de sensormarkt op zich niet erg kapitaalkrachtig is lijkt dit fnuikend voor de ontwikkelingskansen van geintegreerd optische sensoren. Gelukkig spelen dezelfde of sterk verwante technologische problemen ook in de ontwikkeling van electronische IC's en nog meer bij de ontwikkeling van geïntegreerd optische functies voor de optische telecommunicatie. Dit betekent dat men het zware technologische onderzoek werk voor een belangrijk deel op de schouders van deze economisch sterke sectoren kan leggen en voorzover niet gehinderd door patenten de daar verkregen resultaten simpelweg in het eigen werk kan opnemen.

2. Lichtgeleiders

In de geïntegreerd optica plant het licht zich voort door planaire- of kanaal lichtgeleiders. Het eerste type bestaat uit een meerlagenstructuur, die m.b.v. micro-technologieën als opdampen, sputteren, diffusie enz. op en soms in een substraat is aangebracht. Dit lagenpakket bevat minstens één zgn. kernlaag (dikte 0,5 - 5µm) die aan weerszijden omgeven is door lagen met een lagere brekingsindex. Het brekingsindex-verschil zorgt ervoor dat lichtstralen, die onder een voldoend grote hoek vanuit de kernlaag op de grensvlakken invallen volledig reflecteren. De stralen zijn bij hun voortplanting a.h.w. in de kernlaag opgesloten.

In de kanaallichtgeleider wordt het licht ook in een tweede dimensie opgesloten, door nu ook in laterale richting (effectieve) brekingsindex verschillen aan te brengen. Dat kan worden bereikt door bv. met ionenbundel-etsen aan weerszijden van het beoogde kanaal de kernlaag geheel of gedeeltelijk te verwijderen (fig. 1). De breedte van de kanalen is 2-10µ. Zo'n kanaal is te zien als een "platgeslagen" fiber, die vastzit op een substraat. Net als bij de fiber volgt het licht het kanaal, ook in (niet te scherpe) bochten.

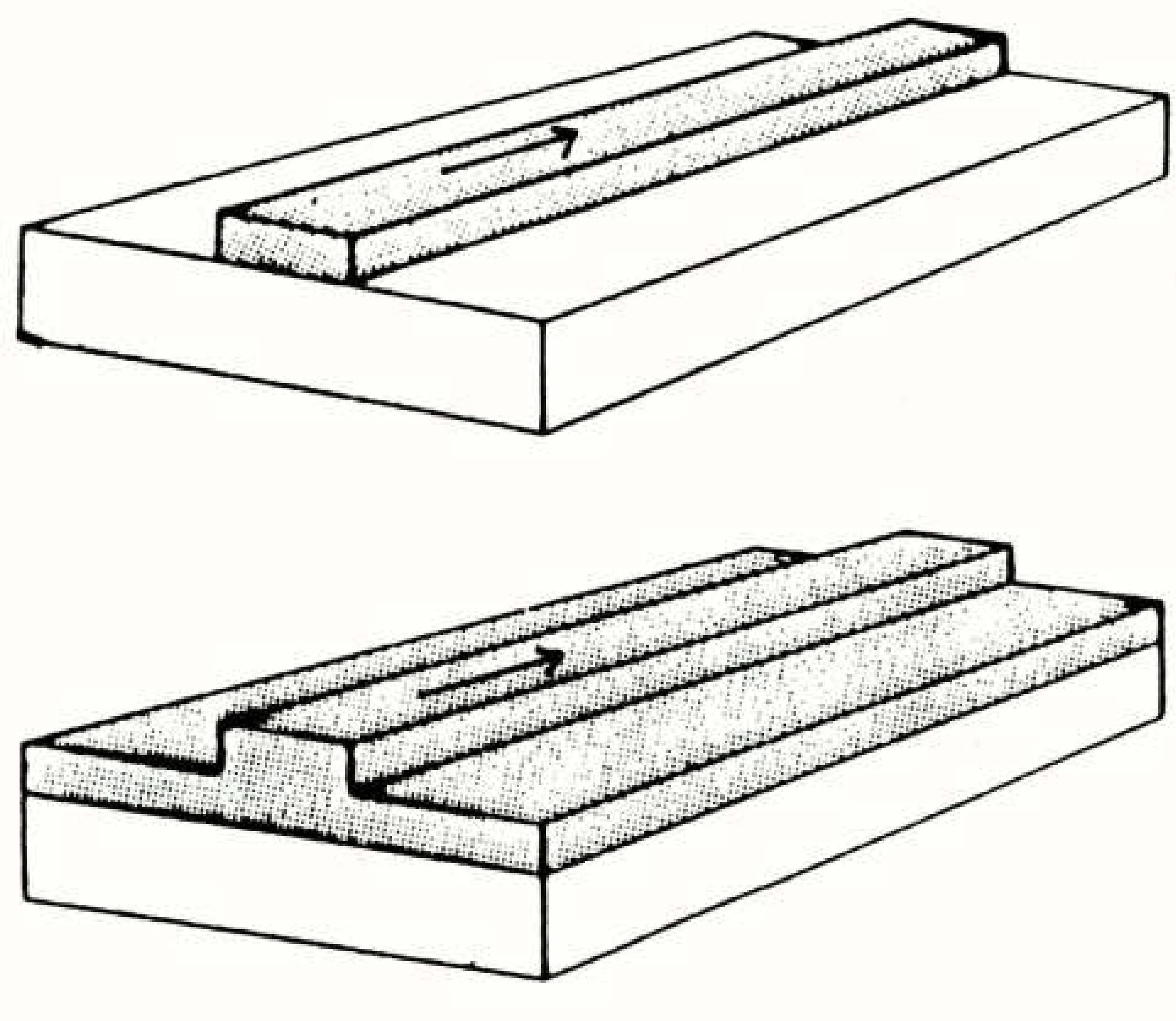


Fig. 1 Een strip geschikt gekozen materiaal vormt een kanaallichtgeleider. De (effectieve) brekingsindex van de strip is hoger dan die van de omringende delen.

Zojuist werd lichtgeleiding aannemelijk gemaakt met het beeld van interne reflectie van licht in de kernlaag. Uitgaande van de Maxwell vergelijkingen kan de lichtgeleiding netter en in meer detail beschreven worden [1]. Dan blijkt, dat voor elke frequentie licht zich slechts volgens een beperkt aantal patronen in de lichtgeleider kan voortplanten: de zgn. geleide modes. Met de z-als voortplantingsrichting kan het corresponderende elektrische veld beschreven worden als:

$$E(x,y,z,\omega,t) = (E(x,y,\omega) \cdot \exp(j[\omega t-\beta(\omega)z])$$

Het modeprofiel E(x,y) en de propagatieconstante β zijn afhankelijk van de geometrie en de diëlektrische constantes van de lagenstructuur en kunnen numeriek worden berekend (zie fig. 2). Uit deze berekeningen en de daaruit volgende veldprofielen blijkt dat enkele procenten van de lichtenergie zich buiten het hoge brekingsindexgebied (de kernlaag) voortplanten, in de vorm van exponentieel afvallende (evanescente) velden, waarbij de structuur

afhankelijke decay-lengte doorgaans tussen 0,1 en 10μm is. Dit betekent, dat ook verschijnselen die zich buiten het voortplantingskanaal afspelen de mode-parameters kunnen beïnvloeden.

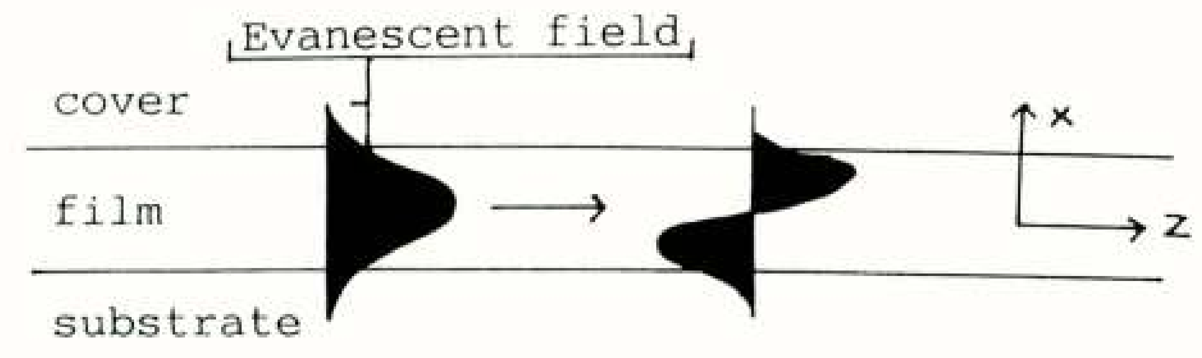


Fig. 2 De veldverdelingen van geleide modes, respectievelijk 0^e en 1^e orde mode van een planaire lichtgeleider.

3. Sensor opbouw

Hoewel er optische sensoren zijn, waar de te meten parameter, in dit geval een chemische concentratie, zich manifesteert door licht generatie, zijn vrijwel alle lichtgeleidersensoren van het modulatortype. Dit betekent dat in het sensingdeel de te meten grootheid, de waarde van één of meer van de mode parameters beïnvloedt.

De mode-parameter kan vervolgens met speciale optische uitleestechnieken in een intensiteit worden omgezet en die op zijn beurt met een detector simpel in een electrische spanning. Vaak vereist het sensorprincipe licht van maar één frequentie of maar één polarisatierichting. Tussen een goedkope licht-diode en het sensing deel worden dan nog (geïntegreerd) optische functies aangebracht, die van het aangeboden licht alleen de gewenste componenten doorlaten. De algemene opbouw van zo'n sensor systeem is in fig. 3 gegeven.

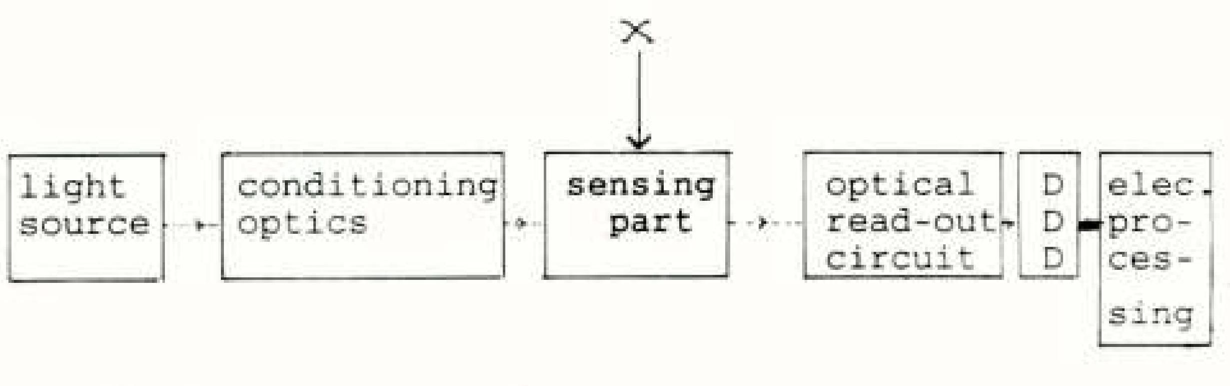


Fig. 3 Opbouw van een optisch sensorsysteem.

4. Voorbeelden

Geïntegreerd optische sensoren zijn vaak miniaturisaties van bekende meetsystemen, zoals de Michelson- en de Mach-Zehnder-interferometer.

4.1 Michelson-interferometer

Fig. 4a schetst het bovenaanzicht van de microversie van de Michelson-interferometer, geschikt voor het meten van verplaatsingen [2] (bereik 0-20 cm, resolutie 0,1μm). Dit is één van de weinige geïntegreerd optische sensoren, die al commercieel verkrijgbaar zijn [3]. Het principe is direct te herkennen m.b.v. fig. 4b. De twee bundels die de bundelsplitser verlaten, worden bij hun terugkeer weer door diezelfde splitser samen en tot interferentie gebracht. De resulterende intensiteit is afhankelijk van het verschil ΔL in de lengte van de wegen, die beide bundels hebben afgelegd:

$$\frac{I_{uit}}{I_{in}} = 1/2 \cos^2 \frac{2\pi\Delta L}{\lambda}$$

waarbij λ de golflengte van het gebruikte licht is. De fase verschuiver (π/2) en de bundelverdeler zijn aangebracht om de richting van de verplaatsing te kunnen bepalen. In het geïntegreerd optisch circuit vervult de lens de conditionerings functie het resterend deel verzorgt de uitlezing. De werkelijke modulatie, i.c. de invloed van de werkafstand op de fase van een van de lichtbundels vindt **buiten** het circuit plaats: de sensor heet dan **extrinsiek**. Het systeem bevat een aantal functies (lens, spiegel, fase-verschuiver, bundelverdeler) die er alle op berusten, dat locaal de (effectieve) brekingsindex verhoogd kan worden, door alleen op die plaatsen de claddinglaag op de kernlaag te laten zitten. Opvallend is dat in dit circuit het licht alleen in de richting loodrecht het substraat opgesloten is en er geen kanaal geleiders gebruikt worden. Voor dit type circuit blijkt dit technologische voordelen te hebben. Heel anders ligt dit bij de Mach-Zehnder interferometer.

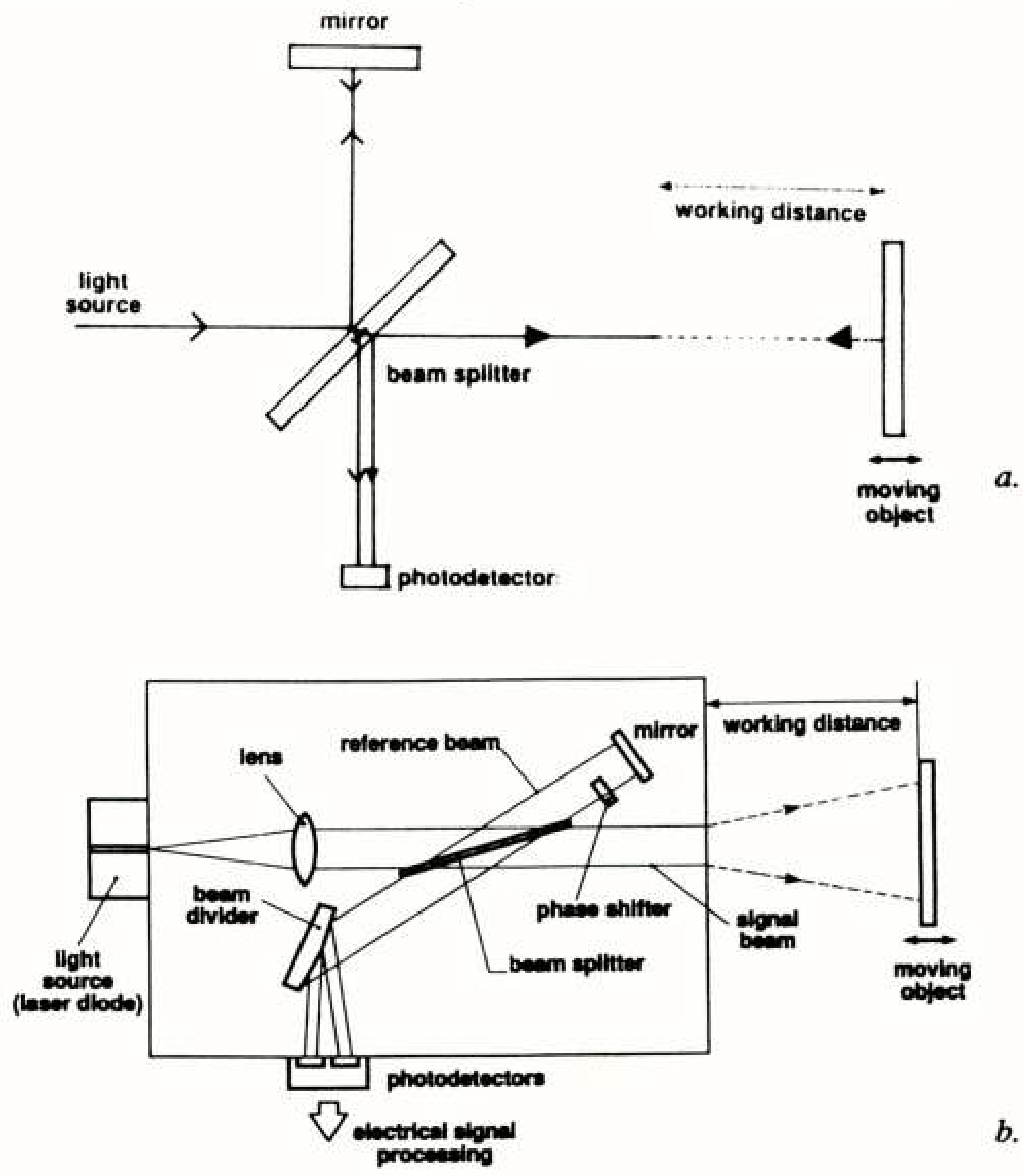
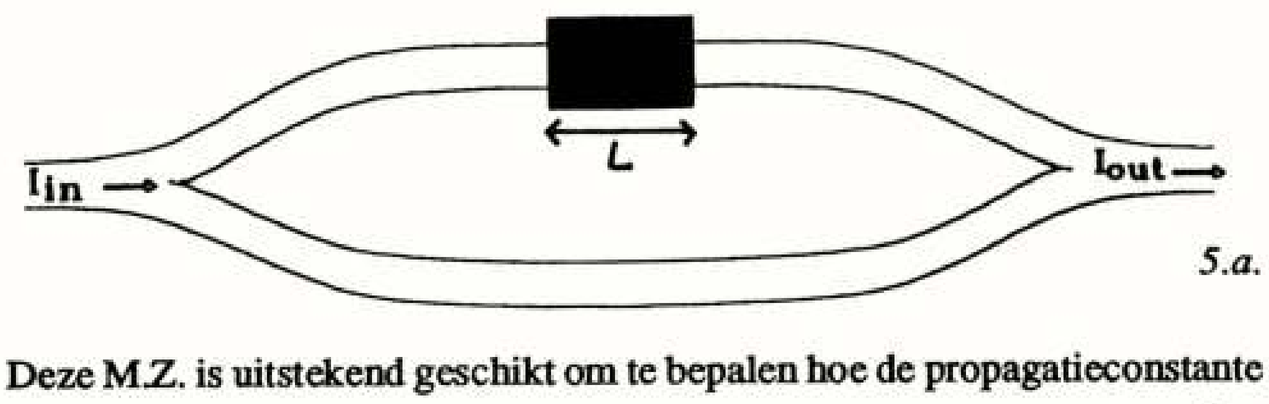


Fig. 4 Michelson-interferometer; geïntegreerd optische versie (a) en basisprincipe (b).

4.2 Mach-Zehnder interferometer

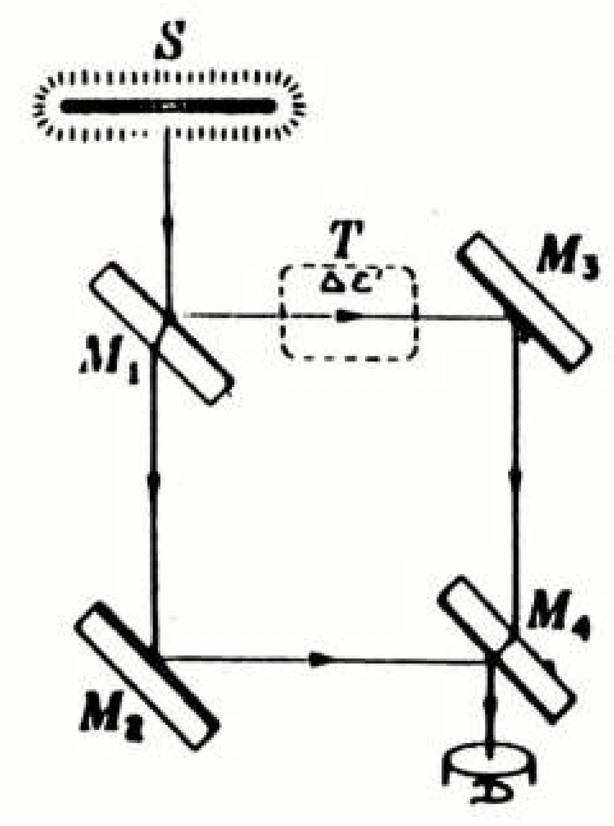
In de microversie (fig. 5a) van de Mach-Zehnder (M.Z.) interferometer is de functie van de klassieke bundelsplitsers (fig. 5b) overgenomen door de Y-junctie. Ook hier wordt de overdrachtsfunctie gegeven door het faseverschil φ tussen het licht dat uit beide takken in de tweede Y-junctie weer samenkomt:

$$I_{uit} / I_{in} = \cos^2\varphi/2$$



5.a.

Deze M.Z. is uitstekend geschikt om te bepalen hoe de propagatieconstante β in één van de takken door de te meten grootheid gemoduleerd is: $\Delta\varphi=\Delta\beta L$, waarbij L de interactielengte is. Zoals eerder gezegd wordt deze propagatie constante geheel bepaald door de diëlectrische constantes en de afmetingen van de in de lichtgeleider aanwezige lagen. Voor dit sensortype moet dus



5.b.

Fig. 5 Mach-Zehnder interferometer; geïntegreerd optische versie (a); klassieke versie (b).

één van deze parameters door de te meten grootheid beïnvloed worden. Dat kan door bv. in het geval we een magneetveld willen meten één laag te kiezen, waarvan dielectrische eigenschappen afhankelijk zijn van het magneetveld; m.a.w. een magneto-optisch materiaal. Bij de M.Z. interferometer wordt op één van de takken op de kernlaag de gevoelige laag aangebracht. Deze kan dus magneto-optisch zijn, maar naar wens ook bv. electro-optisch of chemo-optisch. Door deze opzet wordt het mogelijk een hele sensor familie te maken, waarbij elke sensor voorzien is van een materiaal dat voor een bepaalde grootheid gevoelig is. In deze sensor vindt de modulatie plaats in de lichtgeleider: het is een intrinsieke sensor. De gevoelige laag wordt a.h.w. afgetast door het evanescent veld: het is ook een evanescent-veld sensor.

Een bruikbare goedkope uitvoeringsvorm bestaat uit een glassubstraat, waarin kanalen en Y-juncties worden gedefinieerd door een lokale Ag+-diffusie in glas (de zilverionen verhogen de brekingsindex) [4].

Verrassend is, dat met deze sensor ook hele kleine verplaatsingen (< 1µm) gemeten kunnen worden (zie fig. 6). De verplaatsing is immers equivalent met een (locale) verandering van de dielectrische constante in het evanescent veld gebied!

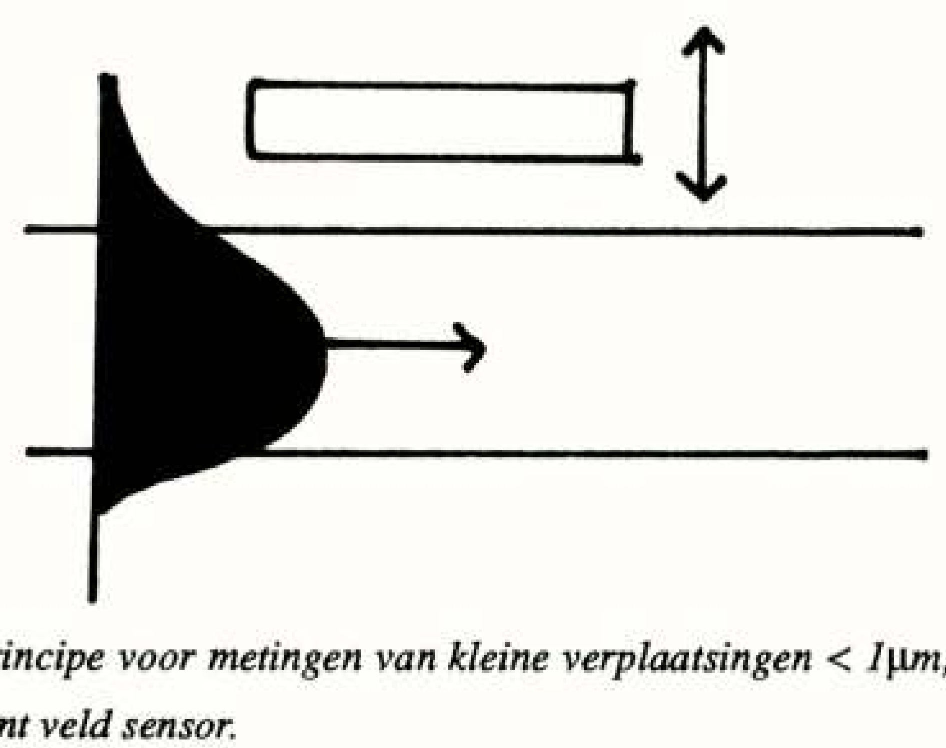


Fig. 6 Principe voor metingen van kleine verplaatsingen < 1µm, met een evanescent veld sensor.

Naast het M.Z. principe zijn er nog vele andere principes, waarmee zo'n verandering in de dielectrische constante uitgelezen kan worden. Al deze methodes worden momenteel grondig onderzocht en geëvalueerd, waarbij het technologisch aspect veelal de hoofdrol speelt [5].

4.3 Uitleeskop voor optische geheugens

Technologische beperkingen kunnen op zich verschrikkelijk interessante principes volledig de nek omdraaien. Zo is een integreerd-optische uitleeskop voor optische schijven (gebaseerd op reflectie verschillen tussen 0- en 1-state) gebieden voorgesteld [6], waarmee naast het uitlees signaal ook direct de fout in scherpstelling en spoorvolging gemeten kon worden (fig. 7). In dit device worden in de kernlaag periodiek groeven aangebracht, die tesamen als een optisch tralie kunnen werken. Met zo een tralie kunnen bundels binnen de kernlaag van richting veranderd worden, maar ook is het mogelijk hiermee het licht uit de kernlaag te halen (de kernlaag wordt hiermee a.h.w. optisch lek geprikt). Voor focussering van de uitgaande bundel moeten in de tralie nog zeer specifieke patronen aangebracht worden. Computersimulaties van het gedrag van een ideaal device bleken uiterst veelbelovend. De benodigde tralie patronen waren echter van dien aard, dat de technologie (in dit geval de foto-lithografie) niet in staat was ze met voldoende nauwkeurigheid in de kernlaag te implementeren, met het desastreuze gevolg, dat de diameter van de gefocusseerde lichtspot 2,5x groter was dan berekend: 3,5µ i.p.v. 1,4µm. Het beste is zo'n principe tijdelijk in de kast te leggen en te wachten tot de foto-lithografie door de IC-wereld (die immers steeds verder miniaturiseert) zóver ontwikkeld is, dat ze deze toepassing ook aan kan.

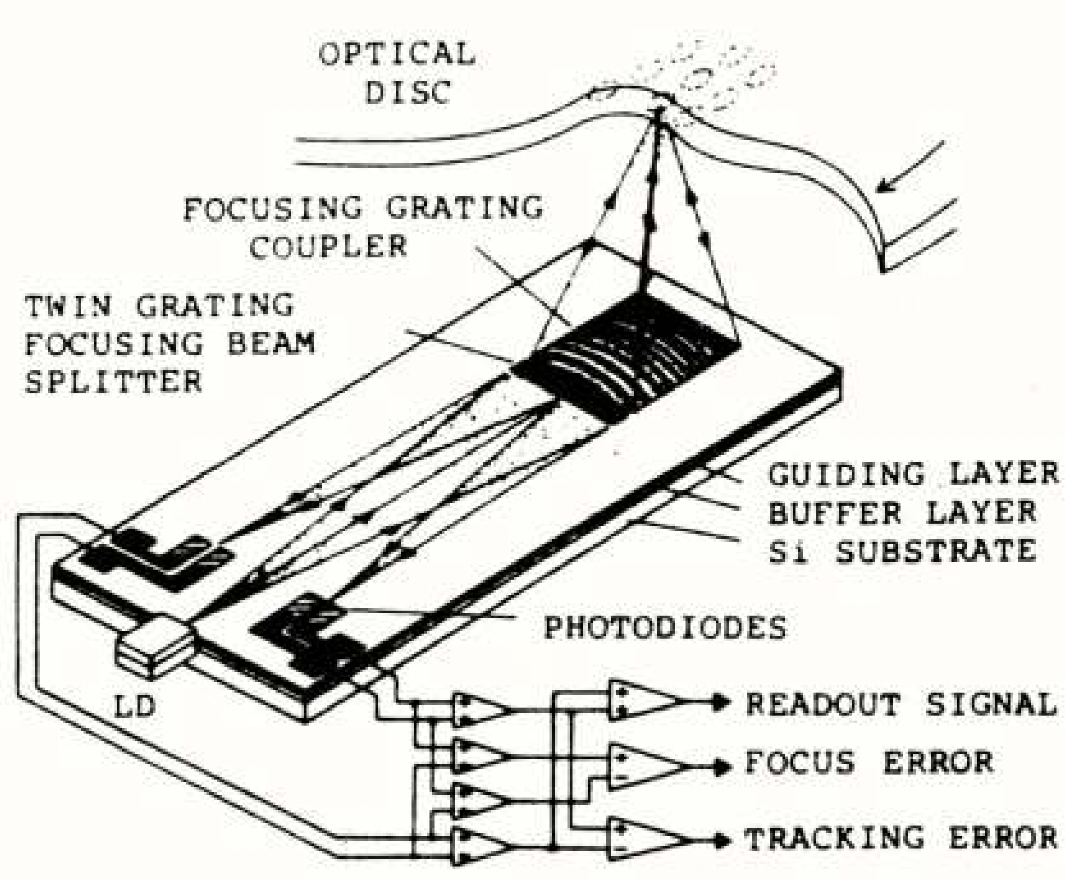


Fig. 7 Geïntegreerd optische uitleeskop voor optische geheugenschijven.

4.4 Oppervlakte plasmonen

Geïntegreerde optica maakt ook meetprincipes mogelijk die geen (volledig) macro-optisch equivalent kennen. Als voorbeeld geven we de op oppervlakteplasmonen gebaseerde sensor [7]. Van een gewone lichtgeleider-mode loopt maar een paar procent van de lichtenergie buiten de kernlaag. Om bij aftasting van de "gevoelige" laag een voldoend groot effect te krijgen is een grote, soms praktisch niet meer realiseerbare interactie-lengte vereist. Door gebruik van oppervlakteplasmonen is dit probleem te ondervangen. Zo'n oppervlakteplasmon is een geleide mode, die langs het grensvlak van een metaal als zilver en een dielectricum kan propageren. Wordt voor dit dielectricum de sensorlaag genomen, dan blijkt ca. de helft van de energie door deze laag te lopen (fig. 8). Dat betekent een sterk vergrootte gevoeligheid. Het is echter niet mogelijk de propagatieconstante van het oppervlakte plasmon met een M.Z.-interferometer uit te lezen. Door de zilverlaag wordt nl. alle energie binnen enkele tientallen microns volledig geabsorbeerd. Voor uitlezing van de β-waarde biedt nu het zgn. mode-koppelings principe uitkomst. In figuur 9 is op een mono-mode lichtgeleider een meerlaagstructuur aangebracht: hierin plant het plasmon zich voort langs het grensvlak van de zilver- en de sensorlaag. Een brede-golflengte bron genereert een band van β-waardes in de onderliggende lichtgeleider: de propagatieconstante is immers afhankelijk van de golflengte. Door mode-koppeling gaat alleen de energie van de kanaal-mode met dezelfde β als het plasmon over naar het oppervlakteplasmon en wordt daarin gedissipeerd. De plaats van

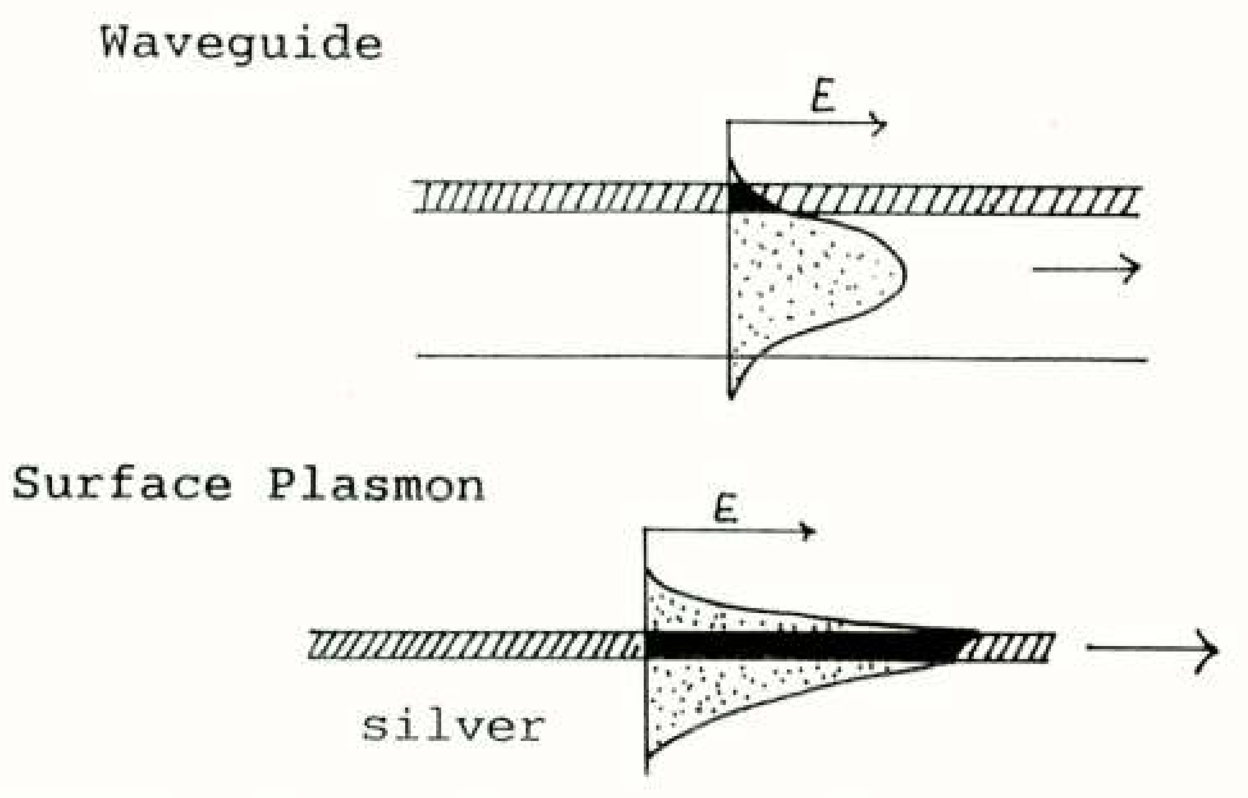


Fig. 8 Veldprofielen van golfgeleider- en oppervlakteplasmon-modes; gearceerd: gevoelige laag.

de "dip" in de uitgaande β-band is een maat voor de te meten parameter. Andere uitvoeringsvormen zijn in onderzoek.

Een voorbeeld [8] is geïllustreerd in fig. 10. In elk van de mono-mode-kanalen wordt vanuit een monochromatische lichtbron een mode gelanceerd. Door geometrieverschillen heeft deze mode voor elk kanaal een iets verschillende waarde voor de propagatieconstante. Het nummer van het kanaal, waarin uitdoving plaatsvindt is bepalend voor de waarde van de te meten parameter.

In het kader van een uitgebreid onderzoekprogramma aan geïntegreerd optische chemische sensoren aan de Universiteit Twente is op basis van het oppervlakteplasmon-principe is een prototype van een chemo-optische ammoniak-sensor gemaakt [9]. Hierin bevat de sensorlaag moleculen, die selectief met ammoniak een complex vormen, waardoor de kleur en daarmee de brekingsindex verandert. De gevoeligheid hiervan is onvoldoende om de ammoniakconcentratie in onze bossen te meten, maar voor toepassing in varkensstallen biedt deze sektor zeker perspektief.

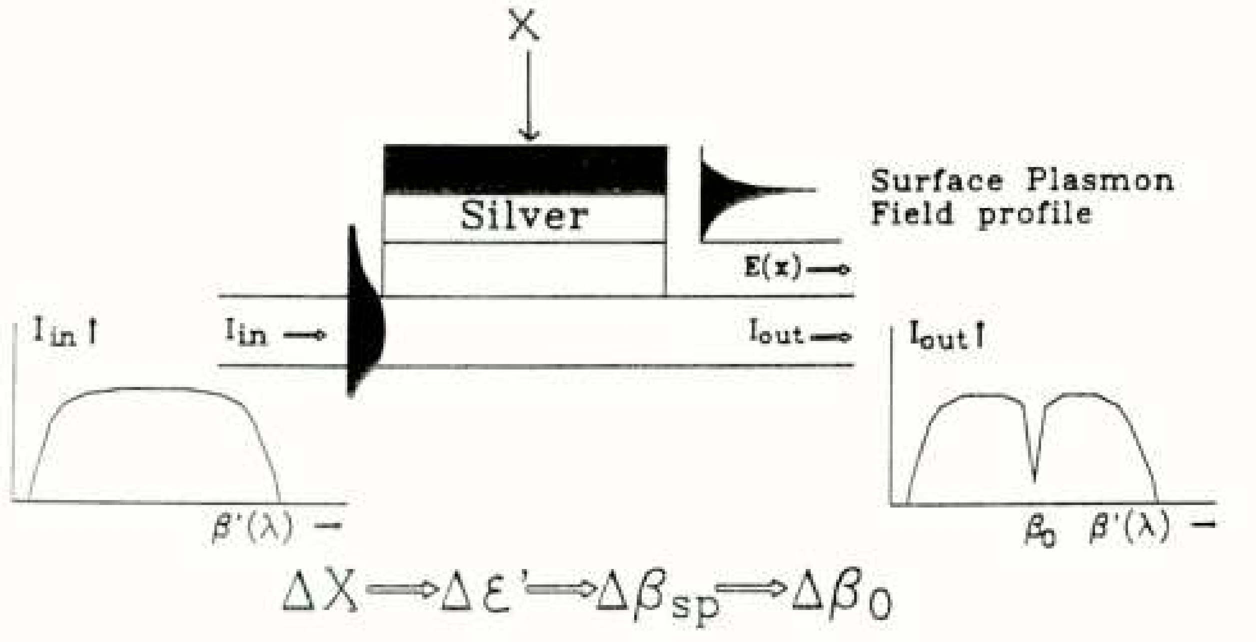


Fig. 9 Oppervlakteplasmon resonantie sensor. De positie van de "dip" in de uitgaande band is een maat voor de te meten grootheid.

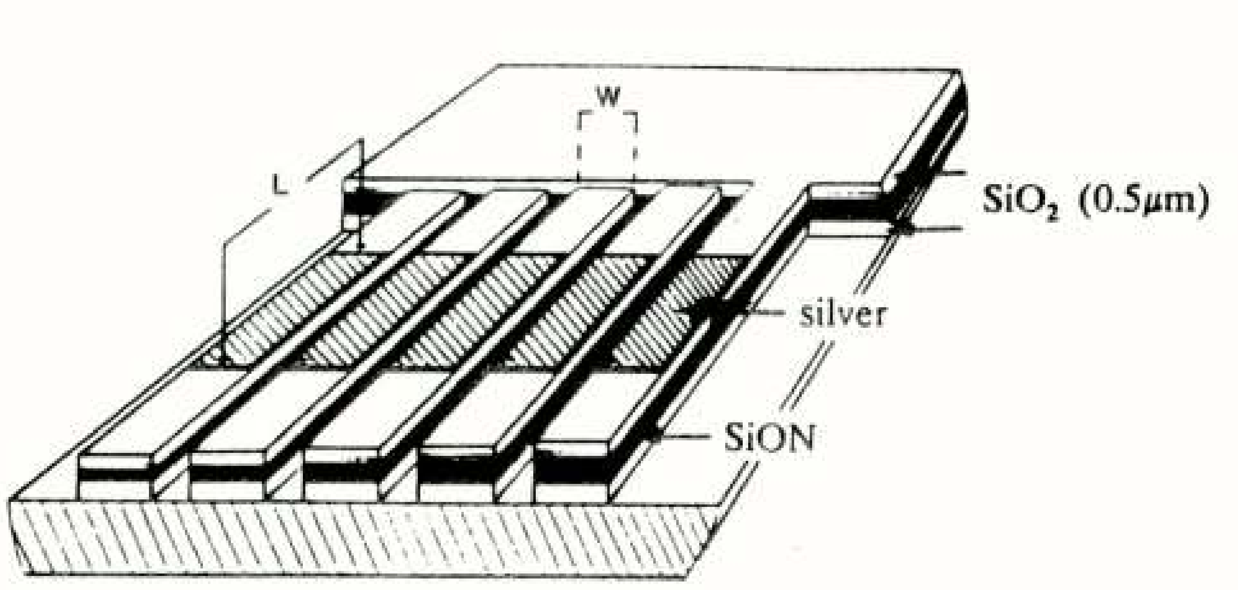


Fig. 10 Schets van een geïntegreerd optische oppervlakteplasmon sensor in een array-uitvoering. Op elk kanaal ligt over een afstand L de "gevoelige" laag.

5. Perspektief

Een steeds groeiende aandacht wordt wereldwijd gegeven aan de ontwikkeling van geïntegreerd optische sensoren. Dit lijkt terecht omdat geïntegreerd optische sensoren een groot aantal sterke punten hebben.

Omdat ze optisch zijn, zijn ze ongevoelig voor electromagnetische stoorvelden en kan geen vonkvorming optreden; daarnaast zijn optische technieken vaak zeer gevoelig. Omdat ze uit lichtgeleiders opgebouwd zijn is de optische weg eenvoudig vast te leggen en is de manier waarop het licht zich voortplant op vele manieren te beïnvloeden. Opbouw van de lichtgeleider structuur in geïntegreerd optische vorm, biedt voordelen qua technologie (door batch-gewijze massaproduktie worden alle functies tegelijk gevormd) en qua performance (klein, licht, star en perspektief op zeer gevoelige monolithische electro-optische multi-sensor chips).

Wanneer een meetprobleem sterk appelleert aan één van deze sterke punten wordt het zinvol aan toepassing van geïntegreerd optische sensoren te denken.

Het ontwerpen en realiseren van geïntegreerd optische sensoren is een multidisciplinaire bezigheid. Fysica (principes), materiaalkunde (materialen met optimale eigenschappen), micro-technologie (het vervaardigen van meerlaagstrukturen en vormgeven van kanaalstructuren) en systeemtheorie (de sensor is een systeem op zichzelf, maar wordt meestal ook weer in een systeem opgenomen) gaan hierbij innig samen. Het benodigde onderzoek wordt tendele door andere velden (IC-technologie, optische telecommunicatie) verricht, maar zal zodra het sensor-specifiek wordt toch door de sensorwereld zelf uitgevoerd moeten worden. De weg naar gecommercialiseerde optische sensorchips is nog lang. Te verwachten is, dat op deze lange weg, regelmatig wat minder geavanceerde maar toch bruikbare sensoren gerealiseerd zullen worden.

6. Referenties

[1] Integrated Optics, T.Tamir ed.

[2] S. Valette
State of the art of integrated optics technology at LETI for achieving passive optical components. J. Mod. Opt. 35 (1988) 993-1005

[3] C.S.O. te Grenoble, Frankrijk

[4] A. Brandenburg
Herstellung und Karakterisierung integriert optischen Wellenleiter auf Glasbasis für sensorische Anwendungen, Proefschrift Techn. Universiteit Claussthal, Duitsland 1989

[5] P.V. Lambeck
Chemo-optical micro-sensing-systems
SPIE vol 1511 (1991) x-x+14

[6] S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara, J. Koyama
An integrated-optic disk pick-up device
Light Wave Techn. 4 (1986) 913-917

[7] H.J.M. Kreuwel, P.V. Lambeck, J. van Gent, Th.J.A. Popma
Surface plasmon dispersion and luminescence quenching applied to planar waveguide sensors
SPIE vol 798 (1987) 218-224

[8] H.J.M. Kreuwel
Planar waveguide sensors for the chemical domain
Proefschrift, Universiteit Twente, 1988

[9] J. van Gent
Surface plasmon resonance based chemo-optical sensors
Proefschrift, Universiteit Twente, 1990

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

XENSOR INTEGRATION: SENSOR TECHNOLOGY COMPATIBLE WITH STANDARD FOUNDRY PROCESSES

A.W. van Herwaarden
Xensor Integration
Schoemakerstraat 97
2628 VK Delft, the Netherlands

Xensor Integration: Sensor technology compatible with standard foundry processes

The past twenty years a lot of sensors have been implemented in the Integrated-Circuits technology (IC-Technology) at the laboratory level. Only a few, most notably the photo-detector, the Hall sensor and the pressure sensor, have gained widespread commercial acceptance. Most integrated sensors are still at the research stage, though. Xensor Integration, a spin-off of the Delft University of Technology, is commercialising some novel families of sensors, in particular thermal sensors and surface acoustic wave (SAW) sensors. Xensor Integration follows the strategy of using complete, standard foundry processes with a compatible after-treatment of the silicon wafers by non-standard processing. Below we will describe this strategy.

The Xensor Integration philosophy

At present, a huge increase in activities can be observed regarding silicon micro-mechanical devices such as sensors and actuators. Up till now, these activities have mainly been carried out by universities and independent research institutes. In Europe, the commercial follow-up of these activities, namely the development and fabrication of useable products, has been hampered by the lack of commercial facilities for micro-machining processes. Foundries of micro-electronics chips have one or more standard processes available. Changing a standard process is unattractive because of the risk of loosing the reproducibility. The monitoring and safekeeping of the reproducibility of the processes is the main focal point of the foundry, because this is vital for the mass fabrication of identical chips.

Foundries for individual process steps are scarce or non-existent in Europe. Therefore Xensor Integration has chosen for developing and manufacturing sensors and actuators by using the standard processes of European wafer foundries, followed by a set of special processing steps. The processing steps are developed in such a way, that they are compatible with the earlier processing steps of the standard foundry processes and electronics. The advantages and disadavantages of this approach are discussed below.

Using standard foundry processes

In Delft, research carried out in the past on sensors measuring thermal quantities required thin membranes with surface material of sufficient quality to allow good junctions and devices, i.e. integrated silicon resistors (used for silicon thermopiles in thermal sensors). Therefore, research on micro-machining of silicon has focused on electro-chemically controlled etching (ECE) of silicon using KOH-solutions, because this allows the fabrication of precisely defined ultra-thin membranes in silicon wafers (4-10 μ thick). In addition, the standard bipolar or CMOS electronics can still be integrated along whenever desired. So, the stage is set for a compatible micro-machining process based on a standard bipolar or CMOS process. There are of course some consequences attached to using standard foundry processes.

Advantages and disadvantages of standardising

There are three main advantages to using standard foundry processes.

- Firstly, you have at your disposal a high-quality process with state-of-the-art technology, enabled by high production volumes in the standard process. The foundry, making wafers for standard electronics, will always maintain a production quantity and quality which is not obtainable for sensor fabrication alone for many years to come, because the volumes are so much higher in electronics.
- Secondly, nowadays the foundries have available for their customers extensive and well-defined libraries of analog and digital electronics. This makes it relatively easy to implement smart sensors, as soon as a sensor has been developed using the standard process.
- Finally, making your micro-machining process independent from the device fabrication process makes you flexible in process choice, you may choose CMOS, bipolar or BiCMOS, whatever is best for the application.

Of course, there is a price to be paid for this strategy. There are two main disadvantages to it.

- Firstly, there are extreme restrictions with respect to process modifications, and some devices simply cannot be made without modifications. In this case one has to convince the foundry to modify its standard process. And preferably this is done in such a way, that the standard electronics components can still be fabricated. This is not always possible technically and commercially.
- Secondly, the standard process is sometimes too good for simple sensor applications, and therefore more expensive.

The sensor process steps at Xensor Integration

One of the main consequences of the choice for standard processes is, that all micro-machining processes have to be carried out after the standard process, and have to be compatible. At Xensor Integration such standard-process compatible micro-machining steps have been developed in cooperation with several foundries. Below we will shortly describe the main sensor technology steps, and their technical implications, both on the standard foundry process and compared to the normal way such a step is carried out.

Lithography

Using the standard equipment and also infrared aligners to align masks on both sides of the wafers, lithography is carried out just like in normal wafer foundries.

Wet etching of membranes

Electro-chemically controlled etching (using KOH-solutions) of membranes in of silicon. Here several difficulties have been overcome.

- There is the need to have a layer on the back side of the wafer which masks the silicon against the KOH-solution. A perfect material for this is LPCVD nitride. Unfortunately, it is almost never possible to obtain this layer when using a standard process. So, one has to resort to low-temperature masking layers such as gold or plasma nitride.
- When etching, one needs silicon of crystal orientation <111>. Some standard processes work with <100> material, and they simply cannot be used.
- One has to develop an etching set-up for efficient etching of the wafers in KOH, solving problems of contacting the epilayer of the silicon wafer, avoiding leakage during the many hours of etching, and avoiding breaking of the wafer by stress. Nowadays standard processes are run on 100 mm wafers or larger, and this increases the problem of leakage (due to longer etch times of thicker wafers) and of breakage (due to larger diameters giving increased stress). Special holders have been developed to overcome these problems.

Deposition of plasma nitride layers

As mentioned above, for masking against KOH and also for other applications, plasma silicon-nitride layers are deposited onto the processed wafers. Because of the aluminum interconnection already present, the wafers may not be heated above 400°C. So, low-temperature plasma processes are used.

Dry etching of windows and channels

Plasma-etching of channels in silicon membranes or silicon bulk material. This allows the formation of thermally isolated free-hanging structures, of importance for high performance of thermal sensors. Whenever this is done after wet etching of membranes, one needs special equipment (modified vacuum wand tips and modified spinner chucks, etc.) for handling of the fragile wafers.

Anodic bonding

In the technique of anodic bonding of silicon to silicon or glass, hermetic seals between entire wafers of silicon to silicon or pyrex glass are obtained by pressing the wafers together at elevated temperatures using electrical biasing.

Thin films

Thin-film layers for piezoelectric and other physical effects not obtainable with silicon.

- An interesting layer is piezoelectric zinc-oxide (ZnO), for Surface-Acoustic-Wave (SAW) devices and for resonating structures. These devices do sometimes require thinner aluminum interconnection layers than usual. Here one is faced with the problem to modify the standard process. Proper passivation techniques to protect these fragile layers have to be applied, for instance using plasma-nitride to cover it. Also polyimide layers are used in these devices, to prevent undesired reflections of the waves.

Sawing of wafers

Sawing of the wafers. This usually has no influence on the standard process, but it is one of the main problems when making micro-mechanical devices. Flushing of the saw-blade with high-pressure water jets often destroys the fragile structures. One has to be very creative, for each structure again, to solve this problem in a way that makes efficient production feasible. Moreover, the normal cleaning steps carried out after the sawing are even more destructive than the sawing itself. And in many micro-machined structures, there is much more need for clean devices than with normal electronics chips after sawing. This poses additional problems. Xensor Integration has developed processes allowing high-yield sawing in small and large quantities for various types of micro-machined devices.

Application of the sensor technology in the thermal sensor family

A promising family of integrated silicon sensors is that of the thermal sensors. These sensors measure physical quantities by their thermal properties. Silicon exhibits several thermal transduction effects, of which the thermo-electric effect enables direct measurement of temperature differences and heat flows, the signals generated in the thermal sensors listed above. However, silicon is an excellent thermal conductor, and in order to make good thermal sensors, it is required to remove all silicon not needed for the transduction in the thermal sensor. Thus, thermal sensors fabricated in the IC-technology all share the fabrication process, in which micro-machining of silicon is carried out to increase the thermal isolation of the sensitive parts of the sensor. Thus, a whole family of structurally similar devices exists, capable of measuring thermal quantities. A typical structure begins with wafers with all the electronic and sensor diffusions, and the aluminum. Then, membranes are etched from the back side. Finally, channels are etched in the membrane to obtain free-hanging beams and membranes, as shown in Fig. 1. Below we will shortly discuss these sensors.

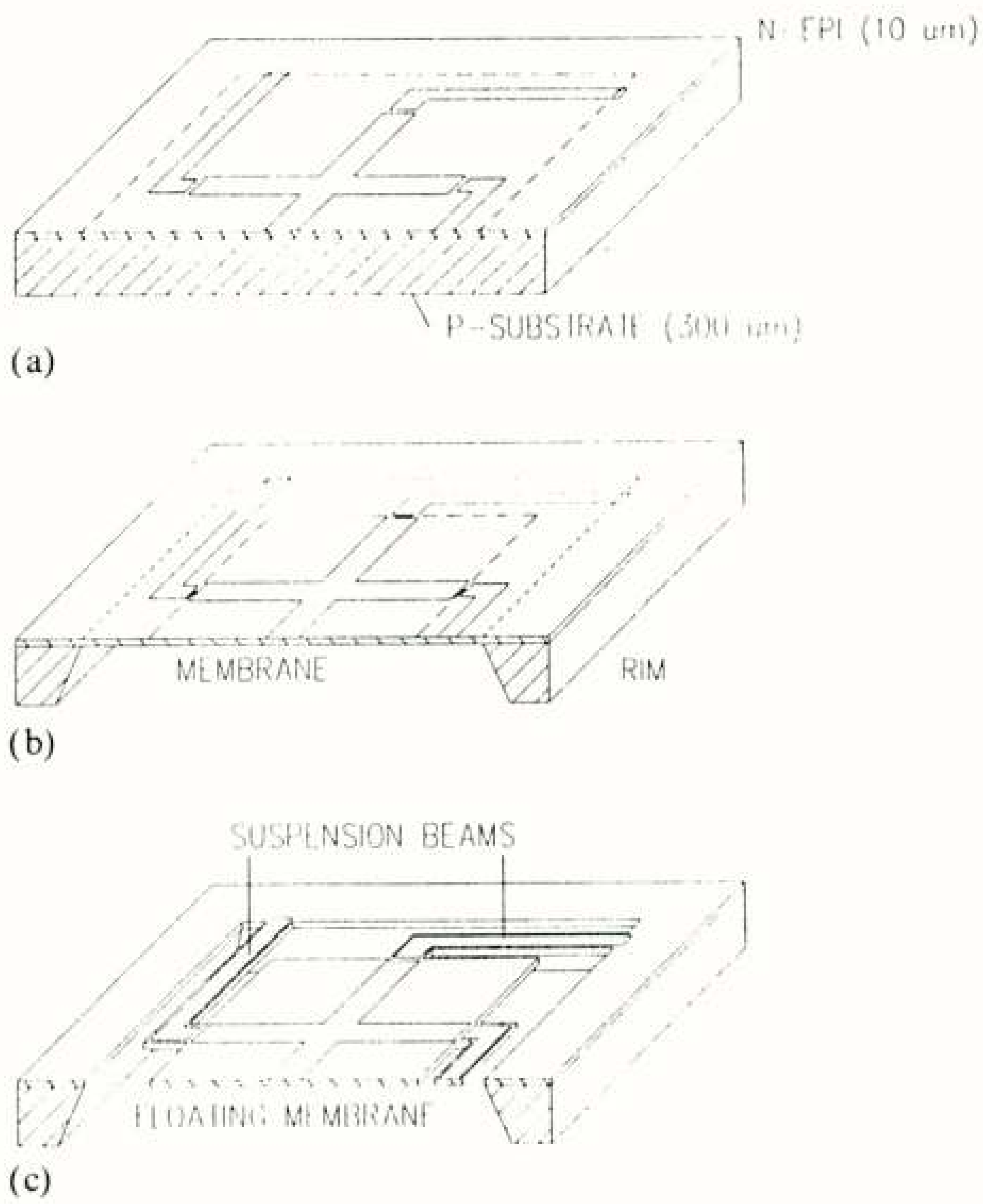


Figure 1 : The micro-machining fabrication process: a) wafer with standard process; b) wet etching of membranes; c) plasma etching of channels.

Flow sensors

In the flow sensors, gas or liquid flow is measured by detecting the cooling effect of the flow on a heated chip area. The better the hot chip area is

thermally isolated from the ambient, the higher the cooling effect and hence the higher the sensitivity. Here, micro-machining of silicon is very important.

Infra Red sensors

In the infrared sensors, infrared radiation is detected by measuring the heat content of the radiation. The radiation is absorbed by a blackened area of the chip, which (again) is thermally isolated from the ambient. The thermal isolation causes the blackened area to rise in temperature, and this rise is a measure for the amount of heat absorbed. Figure 2 shows an infrared sensor mounted in a TO-5 housing (cap diameter 8.5 mm).

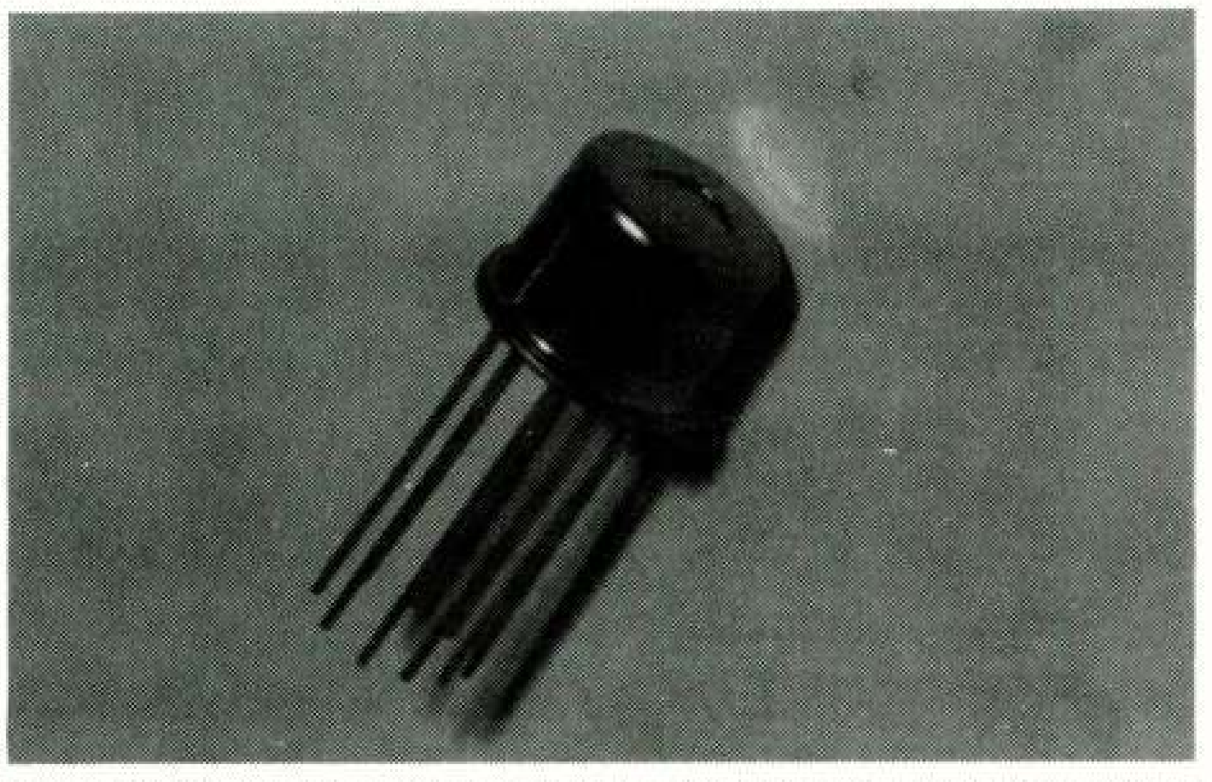


Figure 2: Infrared sensor mounted in a TO-5 housing with infrared-transmitting filter.

Thermal Conductivity Gauge

In the thermal-conductivity gauges one measures the quality of the thermal isolation of a micro-machined sensor. This is influenced by the thermal conductivity of the gas surrounding the sensitive part of the sensor, and in fact one can measure the thermal conductivity of the surroundings. With this, one can either detect gas type (different gases have different conductivities), or measure pressure (at pressures below one atmosphere, the conductivity is proportional to pressure).

Micro-calorimeters

In micro-calorimeters, the heat of chemical reaction is detected. This reaction is catalytically or enzymatically enhanced, and the catalyst or enzyme is deposited on a sensitive part of the sensor. Of course, this sensitive part is thermaly isolated by micro-machining, to increase the performance of the sensor.

Other products of Xensor Integration

Apart from thermal sensors with micro-machined structures, Xensor Integration of course also makes micro-machined structures without any electronic functions, just basic three-dimensional structures, such as microvalves and channel.

Another family of sensors that Xensor Integration produces is that of the SAW (surface acoustic wave) sensors, generally used for gas concentration measurement. These sensors are based on acoustic waves influenced by gases selectively absorbed by specific layers, deposited on the sensor surface. Figure 3 shows an entire sensor system, consisting of the quartz sensor on ceramic carrier, mounted in a gas-tight brass test mount, with sophisticated electronics directly beneath it.

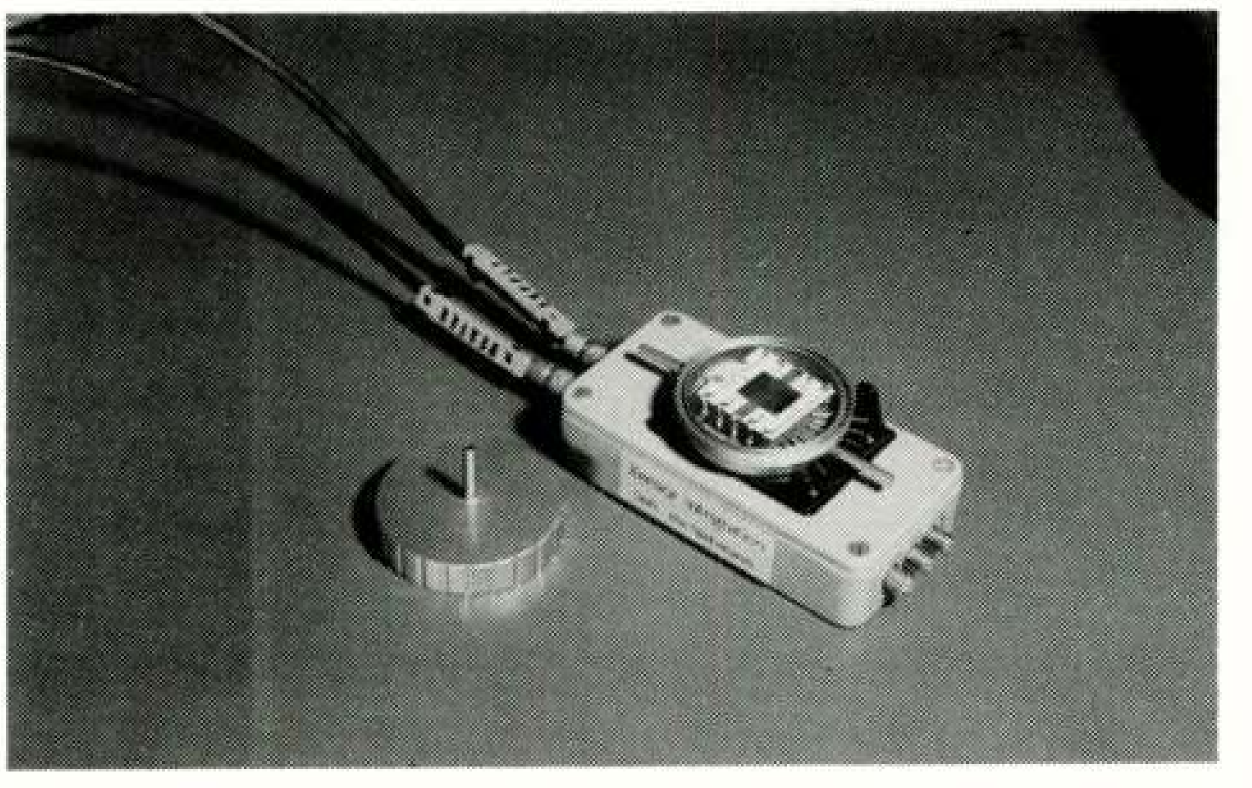


Figure 3: SAW sensor system with quartz dual-delay line on ceramic carrier, gas-tight brass test mount, and 80-MHz electronics.

Conclusions

The absence of a foundry in which micro-machining and other special processes are part of the standard set of processes has, up to date, obstructed a fast growth of the silicon sensor market in Europe. The new developed processes at Xensor Integration, which are compatible with various standard processes such as CMOS, BiCMOS and bipolar processes, have opened up the way for commercialising silicon sensors, and many new thermal sensors are now available as standard. Because a IC-standard process is the first part of the sensor fabrication process, the option to integrate electronic circuitry on the sensor chip during any moment of the product development is an important feature.

Voordracht gehouden tijdens de 388e werkvergadering.

EMC, OOK VOOR INTENSE STORINGEN

Prof.dr.ir. P.C.T. van der Laan, dr. A.P.J. van Deursen
Hoogspannings- en EMC-groep, Technische Universiteit Eindhoven

EMC, even for intense disturbances. In situations with intense disturbances, where measurements are to be made continuously, a reliable and linear protection of electronic systems is essential. Such an EMC-approach turns out to be possible; in this paper a description consistent with Maxwell's laws is given, with emphasis on grounding. Many tests under difficult circumstances have shown the validity of the concept.

Inleiding

Binnen het vakgebied Electromagnetic Compatibility (EMC) worden vele maatregelen beschreven om storingen te onderdrukken. Vaak gaat het daarbij om een beperkte bescherming, genoeg om een bepaald apparaat te laten voldoen aan EMC-richtlijnen. Bij pulsvormige storingen kan men bijvoorbeeld 'begrenzers' gebruiken om tijdens de puls de ingang (ten dele) kort te sluiten. Het apparaat blijft daardoor heel, en na de puls kan het weer geheel normaal functioneren. De begrenzer moet na de puls zijn oorspronkelijke (meestal hoge) impedantie terug krijgen.

Er zijn echter ook situaties met zeer intense storingen, die vragen om een completer en nog betrouwbaarder bescherming. Zeker als men tijdens de storing wil blijven meten zijn de niet-lineaire begrenzers niet acceptabel. De grote vermogens van zeer intense storingen treden meestal in een korte puls op. Voorbeelden zijn doorslagen in hoogspanningscircuits, al dan niet opzettelijk, en ontladingen van condensatorbatterijen zoals gebruikt in het fusie-onderzoek of in andere 'pulsed power' toepassingen. Als een natuurlijke stoorbron is de bliksem interessant.

Om in deze gevallen een storingsvrije werking en storingsvrije metingen te verkrijgen moet men terug naar de Maxwell-wetten om effectieve EMC-oplossingen te kunnen bedenken. Dit artikel beschrijft een aantal zo gevonden inzichten, en praktische toepassingen waarbij de voorspelde bescherming inderdaad is aangetoond. Aangezien de gevonden beschermingsmethode werkt bij hoge stoorniveaus is het ook mogelijk om bij meer 'gewone' EMC- problemen aangepaste methodieken te bedenken. Omdat slechts lineaire componenten worden gebruikt, geen begrenzers, zijn berekeningen en extrapolaties naar allerlei situaties mogelijk.

De beschermingsmethode kan het best worden geïntroduceerd aan de hand van een beschrijving van aarding.

Nieuwe beschrijving van aarding

Reeds eerder zijn publicaties verschenen over onze nieuwe beschrijving van aarding (v. d. Laan 1986, v. d. Laan 1987, v. d. Laan 1988, v. Houten 1990). In dit artikel wordt op een iets andere manier dan in de bovengenoemde publicaties beschreven hoe men tot een goede EMC-aarding kan komen. Zo'n EMC-aarding moet ook werken bij de hoge frequenties die bij storingen voorkomen. De 'klassieke' omschrijving van aarding loopt echter bij hoge frequenties hopeloos vast. Onderstaande 'klassieke' beschrijving schetst dat vastlopen. De geschetste gedachtengang staat nergens zo expliciet in boeken, waarschijnlijk omdat niemand erg gelukkig is met deze onoplosbare zaak.

Klassieke (onjuiste) beschrijving van aarding

Aarding beschrijft men net als vrijwel alle elektrotechnische onderwerpen met de netwerktheorie. Men tekent daarom een vervangingsschema en rekent daarmee alle 'gevaarlijke' spanningen uit, tussen klemmenparen die ver uit elkaar liggen ('verre' spanningen) of die dicht bij elkaar liggen. In het vervangingsschema, waarin de verbindingsdraden slechts symbolen zijn en geen echte lengte hebben, levert het berekenen van verre of dichtbije spanningen (of potentialen), ook t.o.v. Moeder Aarde geen principiële problemen op.

In de elektrostatica is de bovenstaande methode prima van toepassing. Er loopt nauwelijks stroom door de aardgeleiders en ook 'slechte' aardingen zijn goed genoeg om de potentiaal overal nul te maken. Zodra er wel stroom loopt, in gelijkstroom of in 50 Hz circuits, wordt men bezorgd over de werking van het aardingssysteem. Men voegt dan weerstandssymbolen aan het schema toe en berekent bij allerlei 'aardverspreidingsweerstanden' de veranderingen van de potentialen (zie Fig. 1).

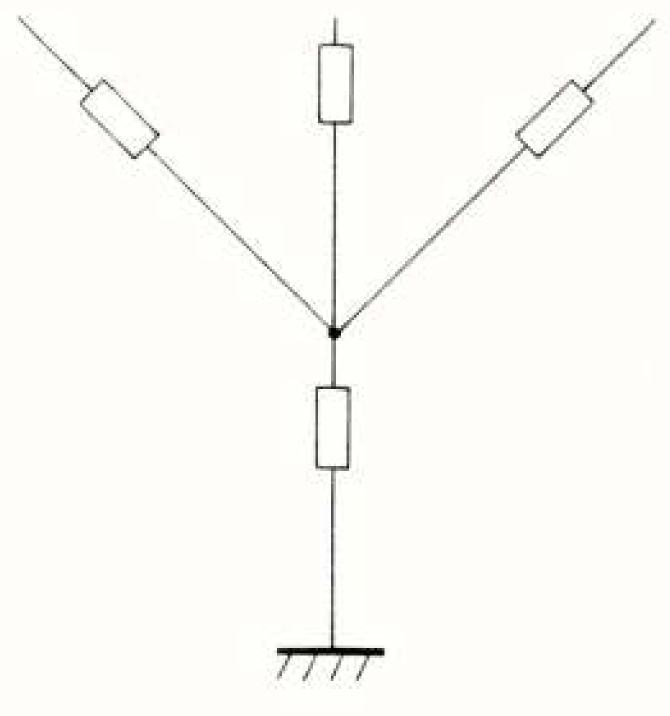


Fig. 1: Het correcte vervangingsschema voor een aardingssysteem waarin gelijkstromen lopen. De weerstanden van de leidingen en de aardverspreidingsweerstand van de ingegraven aardelektrode modificeren de potentialen, zodra er stromen lopen. In het elektrostatische geval loopt er zo weinig stroom dat de weerstanden geen effect hebben.

Let wel dat de stromen het ideale beeld uit de elektrostatica verstoren; stromen worden daarom gezien als een bedreiging van die ideale situatie. Ook bij 50 Hz is het weerstandenbeeld van Fig. 1 vaak nog goed genoeg. In zwaardere netten, waar de dikkere leidingen minder

weerstand hebben, beginnen inductieve effecten echter al een rol te spelen.

Bij de hogere frequenties, die een EMC-aarding ook moet kunnen verwerken, zijn de zelfinducties zeker belangrijk. De verleiding is nu groot om zelfinductiesymbolen toe te voegen aan het vervangingsschema (Fig. 2). Voor de zelfinductie van een rechte draad, eigenlijk slechts een 'partiële' zelfinductie, wordt vaak ca. 1 μH/m ingevoerd. Omdat aardverbindingen dikwijls lang zijn, lijkt de enige oplossing om de spanningen jωLI laag te houden, een kost wat het kost reduceren van de 'vervuilende' stroom I.

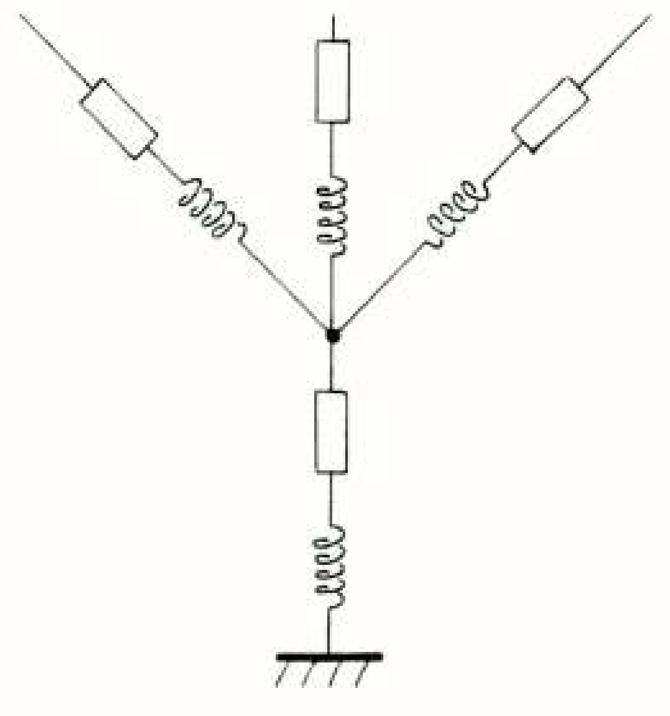


Fig. 2: Het toevoegen van (partiële) zelfinducties aan Fig. 1 laat zien hoe moeilijk aarding wordt als door hoogfrequente stromen grote spanningsvallen jωLI ontstaan. Het begrip partiële zelfinductie en daarmee ook deze figuur is echter incorrect.

De stromen probeert men klein te houden door aardlussen te verbieden, en door onderling goed geïsoleerde aardes te installeren. Zo ontstaan 'aardes' voor verschillende functies, vuil voor 'kracht en licht', schoon voor zwakstroom, zeer schoon voor bv. computers enz.. In feite probeert men terug te keren tot de elektrostatica: geen stroom en alle potentialen dus nul.

Ondanks alle isoleren wordt het echter bij hogere frequenties steeds moeilijker de stromen in de aarddraden in de hand te houden. Parasitaire capaciteiten voeren meer en meer stroom en de lange leidingen kunnen in resonantie komen als ze ongeveer ¼ of ½ golflengte lang zijn.

Nog principiëler bezwaren tegen deze aanpak zijn:

- De uitgebreide leidingen van de aardingssystemen zien er uit als bomen. Een extern, variërend B-veld induceert spanningen tussen de takken, vooral ook tussen takken van naburige bomen. De oorzaak van die spanningen is niet een vervuilende stroom, maar de magnetische flux omsloten door de lus, die de aardleidingen vormen samen met de voltmeter waarmee we de spanning constateren.
- De aardingsboom laat van de elektrische circuits slechts de 'koude kanten' zien. Aardstromen lopen, net als alle stromen in gesloten circuits. Alleen voor die gesloten circuits kunnen zinvol zelfinducties gedefinieerd worden. Partiële zelfinducties, van bijv. een stuk draad moeten niet worden ingevoerd. De spanningsval over zo'n partiële zelfinductie is een 'verre spanning' die afhangt van de loop van de draden van de voltmeter, en die daarom niet eenduidig vastligt. In het netwerkschema wordt dit probleem niet zichtbaar omdat er geen onderscheid gemaakt kan worden tussen ver en dichtbij; let wel dat in het netwerkschema alle afmetingen verdwenen zijn. In de driedimensionale realiteit zijn de verre spannigen bij hoge frequenties en bij in de ruimte verdeelde fluxen niet eenduidig en niet zinvol meer. Het woord 'potentiaal' vermijden we helemaal, omdat daarmee wordt gesuggereerd dat we hetzelfde antwoord krijgen, hoe we de draden van de voltmeter ook leggen.

Correcte beschrijving van aarding

Zoals ook eerder beschreven mogen we de zorgelijke 'verre' potentialen tussen A, B, C en Moeder Aarde (Fig. 3) vergeten. Die verre spanningen en de zelfinductiesymbolen zijn onjuiste begrippen omdat de veranderende fluxen niet in een lokaal doosje maar verdeeld in de ruimte aanwezig zijn. In feite is niet de stroom maar de verdeelde flux de 'vervuiler', die de analyse met vervangingsschema's ongeldig maakt. Gelukkig behoeven we ons alleen maar zorgen te maken over dichtbije spanningen en door een goede keus van de lay-out is daar heel veel aan te doen, zie Fig. 3.

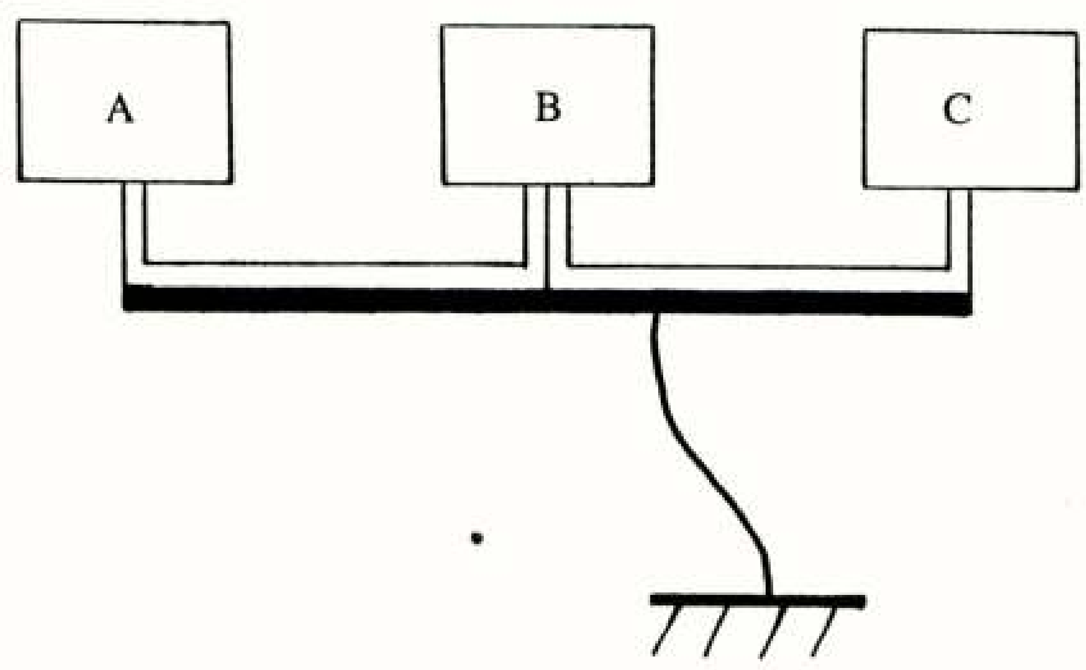


Fig. 3: De systemen A, B en C kunnen correct worden geaard, met een strip, plaat, buis of goot waarop of waarin ook de andere verbindingsdraden lopen. Problemen met dichtbije spanningen moeten lokaal opgelost worden; de verre spanning naar bv. Moeder Aarde is niet gedefinieerd en ook niet van belang.

We leggen goede aardverbindingen (een strip of plaat, of zonodig een goot of buis) aan daar waar het nodig is, nl. dicht bij de verbindingen voor signalen of voor de voeding. Extra metaal en verbinden is nu nuttig en niet het 'scheiden en isoleren' van de klassieke omschrijving. Met het extra metaal maken we allerlei E- velden klein; de keerzijde daarvan is dat er nu meer stromen kunnen gaan lopen. We accepteren die stroom, maar zien nu als het belangrijkste dat de aardstroom (vaak een stoorstroom) slechts weinig stoorspannigen overdraagt naar het te beschermen circuit. Een maat voor die overdracht is de transferimpedantie, een complex getal, met de dimensie Ohm, het quotiënt van de stoorspanning (op een kritieke plaats in het apparaat, meestal de ingang) en de stoorstroom buiten.

De uitdaging voor de ontwerper is nu om bruikbare, aan het probleem aangepaste structuren te verzinnen met een lage transferimpedantie. Met dit soort structuren kunnen 'beschermde gebieden' worden gecreëerd, zowel voor leidingen als voor gevoelige elektroni-

sche apparatuur (v. Houten 1989, v. Houten 1990, v. d. Laan 1988). In Fig. 4 zijn een aantal voorbeelden geschetst van structuren met lage transferimpedantie. De voorbeelden boven zijn bedoeld om leidingen te beschermen; de bekende afschermmantel van een coaxiale kabel kan heel goed beschermen, mits men de mantel aan weerskanten aansluit.

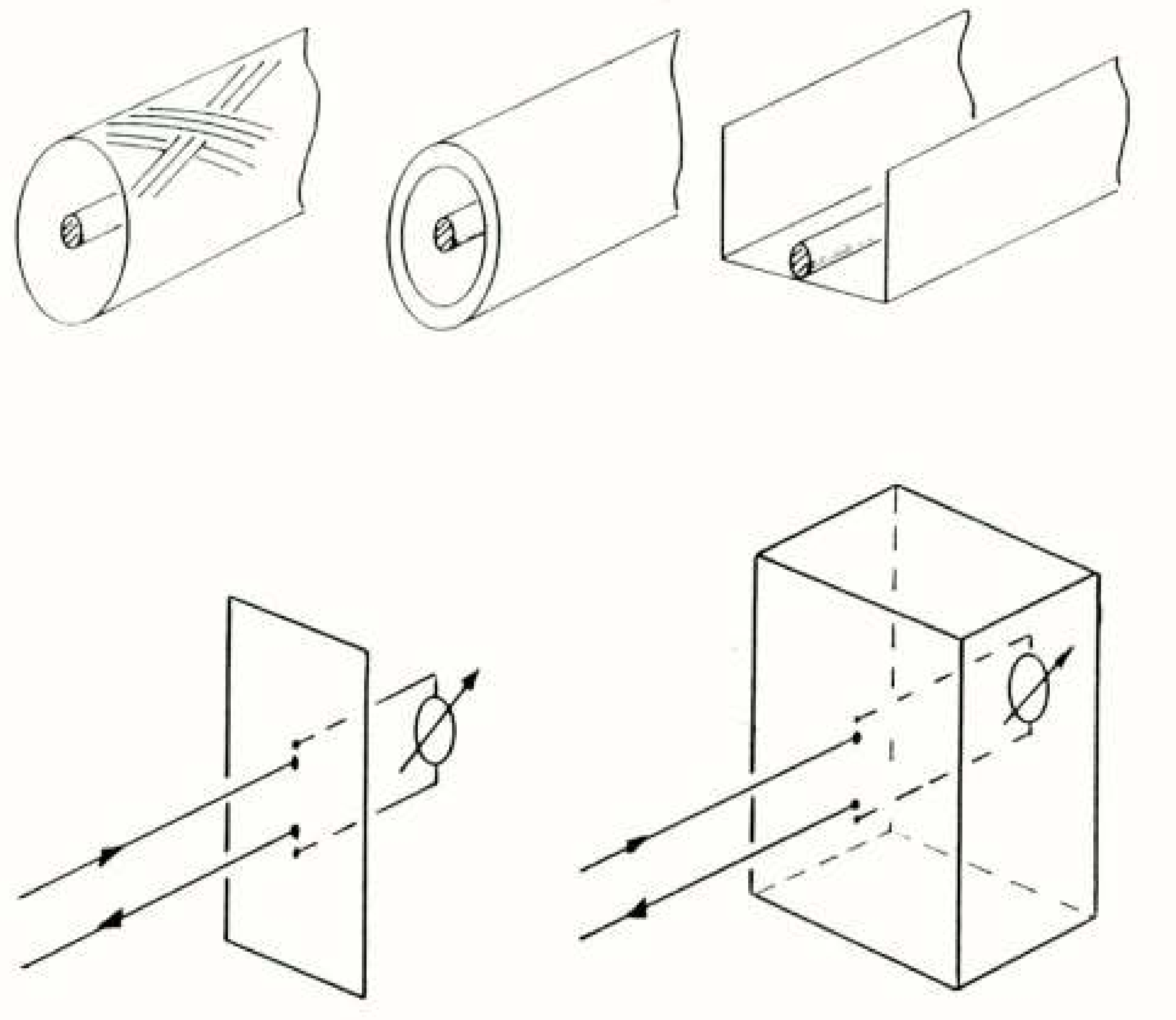


Fig. 4: Voorbeelden van structuren met een lage transferimpedantie. Het gevlochten kabelscherm (bovenaan), een metalen buis zonder gaten of een goot beschermen leidingen. Onderaan geven we enkele structuren waarmee gevoelige elektronica beschermd kan worden. De loop van de stoorstromen is aangegeven met pijlen; de voltmeter moet zo min mogelijk spanning aangeven.

Interessant is dat de transferimpedantie van kabelmantels nog slechts zelden door fabrikanten wordt opgegeven. Een lagere transferimpedantie wordt bereikt met een massieve mantel. Er bestaat zgn. rigid coax met zo'n mantel; uiteraard kan men ook in een bepaalde situatie een metalen buis installeren om alle leidingen heen. In de praktijk is het eenvoudiger om alle leidingen in een goot te leggen. Wanneer zo'n goot diep genoeg is, kan men de transferimpedantie voldoende laag maken.

Vaak is er al veel metaal aanwezig voor constructiedoeleinden. We kunnen het ook voor EMC gebruiken wanneer de stroomgeleiding op een of andere wijze gegarandeerd is. Een (meervoudig geaarde) stalen balk met een H- of T-profiel kan uitstekend als goot gebruikt worden. We leiden de kabels bij voorkeur via de (scherpe) hoeken in het profiel. We passen de loop van de kabels aan; dit is zeker effectiever dan het aanbrengen van een 'vereffenings' draad parallel aan de kabel.

Figuur 5 laat een EMC-kast (v. d. Laan 1988) zien; gevoelige digitale registratie apparatuur werkt daarin uitstekend, terwijl buiten en eventueel ook dicht er bij intense storingen opgewekt worden. De lage transferimpedantie bereiken we door alle leidingen aan te sluiten op het achterpaneel. Daar vindt de stroomuitwisseling plaats tussen de mantels van de coaxiale signaalleidingen, een extra veiligheidsaarde, en de aardleiding meegevoerd met het netsnoer. Eventueel kan er een capacitief ingekoppelde stroom lopen tussen de bodem van de kast en de geleidende vloer. Het 220 V - 'signaal' wordt de EMC-kast binnengebracht via een filter dat zeer goed met de achterwand verbonden is. Onze ervaring is dat het filter aan zekere minimale eisen moet voldoen, maar dat de plaats en de wijze van aansluiting op de kast belangrijker zijn dan het type filter.

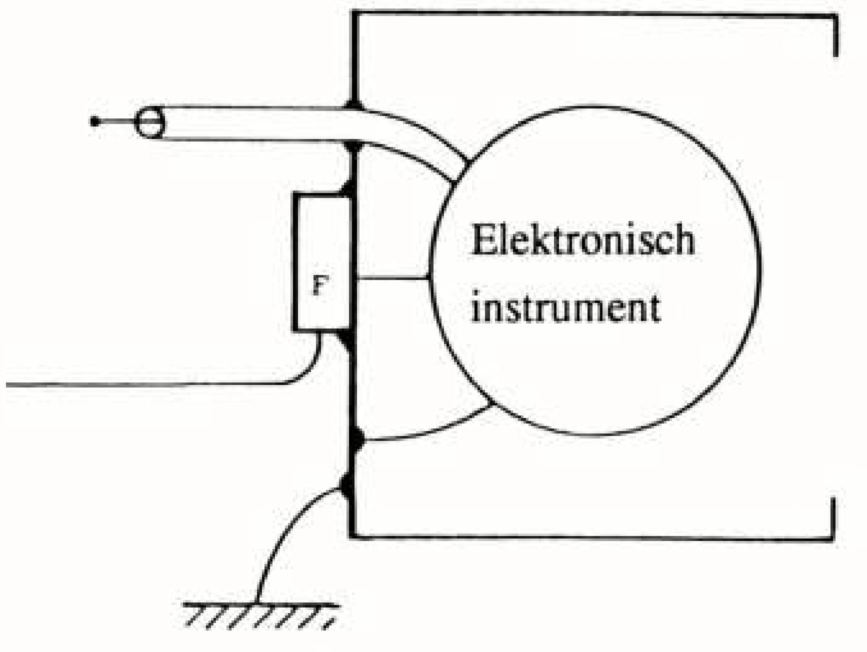


Fig. 5: Een EMC-kast biedt een lage transferimpedantie voor de apparatuur binnen de kast t.o.v. stoorstromen buiten. Op de achterwand vindt er een uitwisseling plaats van de stoorstromen die lopen via de aangesloten leidingen. De 220 V - netleiding wordt binnengevoerd via het filter F.

Bij de 2,4 MV stootspanningsgenerator in het hoogspanningslaboratorium (HSP) aan de TUE is de EMC-kast op ongeveer 5 m van de HSP-deler geplaatst. Onze 200 MHz digitale oscilloscoop werkt correct, ook wanneer de voordeur van de kast open staat. Voor minimale storing wordt ook de loop van de leidingen in de kast van belang. Deze leidingen kunnen we bijv. dicht tegen de binnenwand van de kast laten lopen, waar nodig met de mantels direct op de wand aangesloten. Zo kunnen we de beide zijden van het metaal van de kast benutten voor het bereiken van een goede EMC. De leidingen die buiten op de kast aangesloten zijn, mag men zeker niet langs de open voorkant laten lopen. Stoorstromen door de leidingen koppelen dan direct in op het inwendige van de kast.

Gereduceerde versies van de EMC-kast zijn nuttig voor minder ernstige situaties. Goedbloed (Goedbloed 1990) presenteert een aantal voorbeelden, waarbij de mantels van alle leidingen op een enkele plaat in de achterwand van een apparaat aangesloten zijn; de CM-stroom door de leidingen loopt via deze plaat om de elektronica in het apparaat heen. In een speciaal experiment benutten wij de reeds aanwezige aluminium koelvin in een goedkope kleurentelevisie; tot zo'n 500 A (bliksem-geïnduceerde) stroom wordt zonder schade rond de TV geleid.

We kunnen de EMC-kast ook als het ware binnenste buiten gebruiken. Figuur 6 geeft een voorbeeld van een schijf met daarop gemonteerd een koker die de leidingen omvat. De CM-stroom die via de leidingen aan- en afgevoerd wordt, induceert een stroompatroon op de koker als geschetst. Het magneetveld wordt door de koker begrensd; de koppeling met bijv. een lus aan de andere kant van de schijf is laag. Langere kokers zijn effectiever (van Houten 1990) dan een schijf met grotere diameter bij eenzelfde totale hoeveelheid metaal.

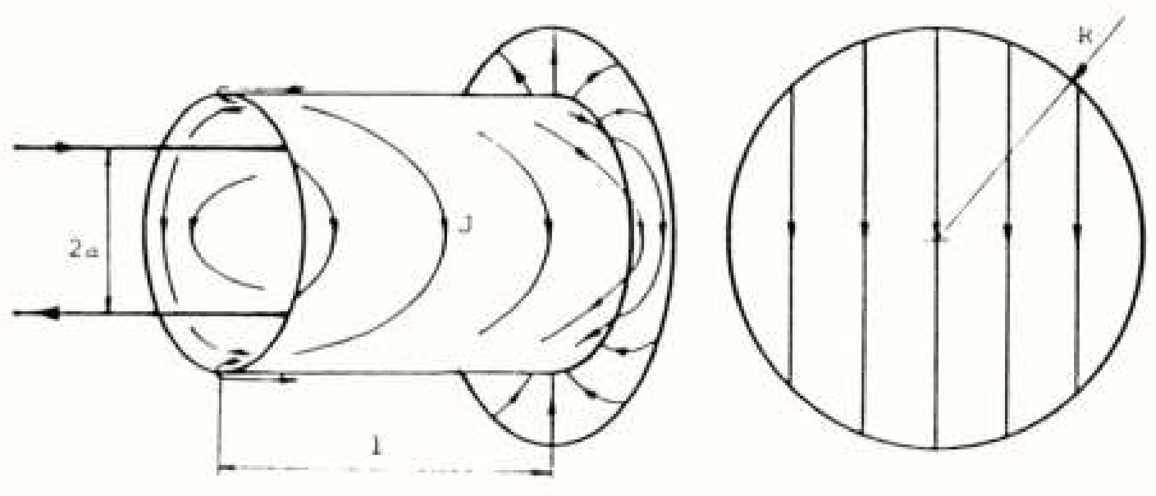


Fig. 6: Een schijf als een gereduceerde EMC-kast. De stoorstroom wordt aan- en afgevoerd via de aangesloten leidingen (onderlinge afstand 2a). In de koker (lengte l) op de schijf (straal R) wordt een stroompatroon (J) geïnduceerd zoals geschetst. De koker concentreert het magneetveld tot het gebied dicht bij de leidingen (linker beeld). Op de vlakke zijde van de schijf (rechter beeld) verdeelt de stroom zich in eerste benadering homogeen. De stroomdichtheid en het bijbehorend magneetveld zijn daar laag; daardoor is ook de overdracht tussen een lus bij de vlakke zijde en de stoorstroom klein.

Toepassingen

De beschreven aardingsstructuren lijken veel op structuren die al langer gebruikt worden in bijv. de hoogfrequenttechniek. In het afstemdeel van ontvangers lopen signalen van zeer verschillende niveau in circuits die zowel fysiek als qua frequentie dicht bij elkaar liggen. Elke kring moet compact uitgevoerd zijn om ongewenste koppelingen te voorkomen. Brede aardvlakken worden veelvuldig toegepast, soms onder de minder juiste benaming afscherming. De ontwerpen zijn veelal gebaseerd op ervaring.

Bij de 'EMP-hardening' van oorlogsschepen worden alle kabels door wanden gevoerd via wartels die rondom elektrisch kontakt maken met de mantels. Elke niet goed gemonteerde wartel wordt bij tests onmiddellijk als lokale zwakke plek gevonden (Fischer 1991).

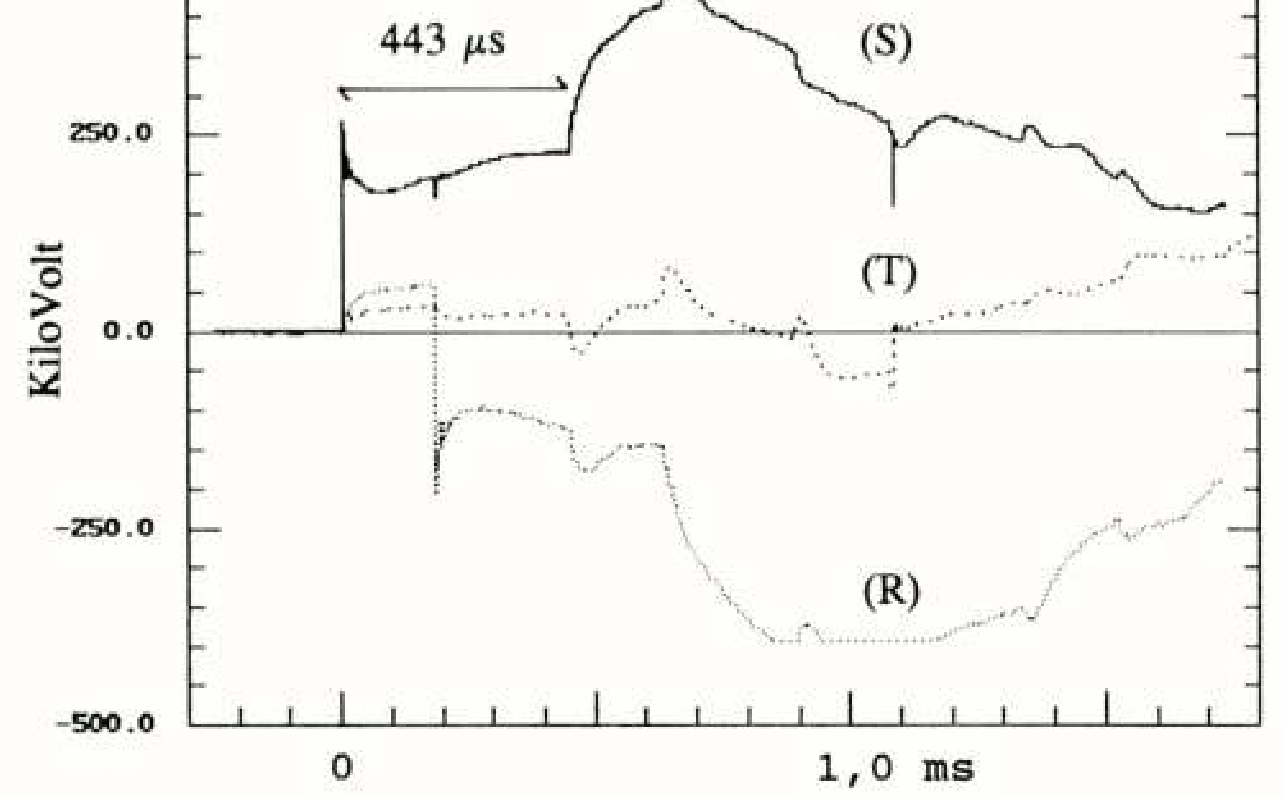


Fig. 7: Het verloop van de spanningen gemeten op de drie fases van de hoogspanningsleiding in het station 'Maasvlakte' bij schakelen in dat station (van Heesch 1989). De belasting werd gevormd door de 66 km lange leiding naar het station 'Crayestein'. De drie polen van de zware vermogensschakelaar sluiten met onderlinge vertraging; fase S eerst, dan R en pas na 1,1 ms T. Duidelijk waarneembaar zijn de reflecties na de looptijd van 443 μs.

Onze EMC-kast heeft zich bewezen onder zeer moeilijke omstandigheden. We meten aan schakelhandelingen in onderstations met de kast direct onder 380 kV HSP-leidingen, of opgesteld direct naast een 150 kV gasgeïsoleerd systeem (GIS). Met de open kast hebben we o.a. gemeten in de Maasvlakte centrale (380 kV GIS), te Sassenheim (150 kV GIS), in de open stations 'Geertruidenberg' (380 kV) en 'Den Bosch Noord' (150 kV), en langs de spoorlijn van de Franse TGV. Een voorbeeld van een spanningsmeting in de Maasvlakte geven we in Fig. 7. Bij al deze experimenten is ook een differentiërend-integrerend meetsysteem gebruikt, dat speciaal ontwikkeld is voor metingen in een sterk storende ongeving. Dit meetsysteem wordt elders (van Heesch 1989) in meer detail beschreven.

Bliksembeveiliging voor elektronische apparatuur zou men moeten ontwerpen op basis van stromenloop en een lage transferimpedantie. De bliksemstroom zelf is groot en niet beheersbaar; zeer hoge spanningen kunnen geïnduceerd worden in allerlei circuits. In een experiment met de Nederlandse PTT hebben we voornamelijk het vele koper dat er toch al lag, anders aangesloten. Daarmee hebben we de loop van de stroom zo veranderd dat de veiligheid naar de apparatuur toe aanzienlijk verbeterde. Een volledige beveiliging tegen blikseminslag is met onze aanpak haalbaar. Door op de juiste plaatsen, dicht bij de gevoelige leidingen en apparatuur, metaal te monteren (in de vorm van goten of mantels) kan men de relevante spanningen laag houden. Ook moeten we voldoende aandacht geven aan de details van de aansluitingen.

We beschouwen overspanningsafleiders als een noodsprong, slechts te rechtvaardigen indien er tegen minimale kosten gewerkt moet worden of wanneer er beschermd moet worden tegen ernstige fouten die buiten het apparaat gemaakt kunnen worden. Overspanningsafleiders leiden tijdens de inslag een deel van de stroom af. De eerste vraag is dan waarheen; heeft dit pad een voldoend lage transferimpedantie? De twee vraag is: produceren de afleiders geen gevaarlijke steile spanningen of nieuwe frequenties bij het 'doorslaan', juist aan de ingang van de apparatuur die we willen beschermen.

Als demonstratie laten we in het HSP-lab een anderhalve meter lange vonk (ca. 1 MV open spanning, 4 kA stroom) inslaan op een mast. Een goedkope 'walkman' is op 2 m hoogte aan de mast gemonteerd in een open EMC-doosje. Een lange coaxiale RG223-leiding vormt de verbinding naar een luidspreker in de EMC-meetkast op 5 m van de mast. Er zijn nergens begrenzers in het circuit opgenomen. De walkman overleeft de inslag op de mast en speelt gewoon door. Daarvoor is het wel belangrijk dat de RG223 luidsprekerleiding dicht langs alle aanwezige metaal gevoerd wordt.

Dankwoord en verantwoording.

Vele leden van de vakgroep EHC aan de TUE hebben bijgedragen aan de ideeën verwerkt in deze publicatie, waarvoor onze dank. De metingen in de Maasvlaktecentrale en te Sassenheim zijn verricht onder leiding van E.J.M. van Heesch. Enkele van de figuren zijn overgenomen uit het proefschrift van M.A. van Houten (van Houten 1990).

Literatuur.

- W.G. Fischer, G.R. Hunt, 'Warship EMP hardening. The theory, the pratice , the result.', Proc. 9th Int. Symp. EMC, Zürich (1991) p. 377.

- J.J. Goedbloed, 'Elektromagnetische Compatibiliteit', Kluwer 1990.
- E.J.M. van Heesch, A.P.J. van Deursen, M.A. van Houten, G.A.P. Jacobs, W.F.J. Kersten, P.C.T. van der Laan, 'Field tests and response of the D/I H.V. measuring system', Proc. 6th Int. Symp High-Voltage Eng., New Orleans (1989) paper 42.23
- M.A. van Houten, E.J.M. van Heesch, A.P.J. van Deursen, J.N.A.M. van Rooy, P.C.T. van der Laan, 'General methods for protection of electronics against interference, tested in high-voltage substations', Proc. 8th Int. Symp. EMC, Zürich (1989) p. 429.
- M.A. van Houten, 'Electromagnetic compatibility in high-voltage engineering', Proefschrift TU Eindhoven (1990).
- P.C.T. van der Laan, M.A. van Houten, 'Design philosophy for grounding', Proc. 5th Int. Conf on EMC, York (1986) p.267
- P.C.T. van der Laan, M.A. van Houten, A.P.J. van Deursen, 'Grounding philosophy', Proc. 5th Int. Symp. EMC, Zürich (1987) p. 567.
- P.C.T. van der Laan, E.J.M. van Heesch, A.P.J. van Deursen, 'Digital measurements in high interference surroundings', Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap ***53*** (1988) 13

Voordracht gehouden tijdens de 384e werkvergadering.

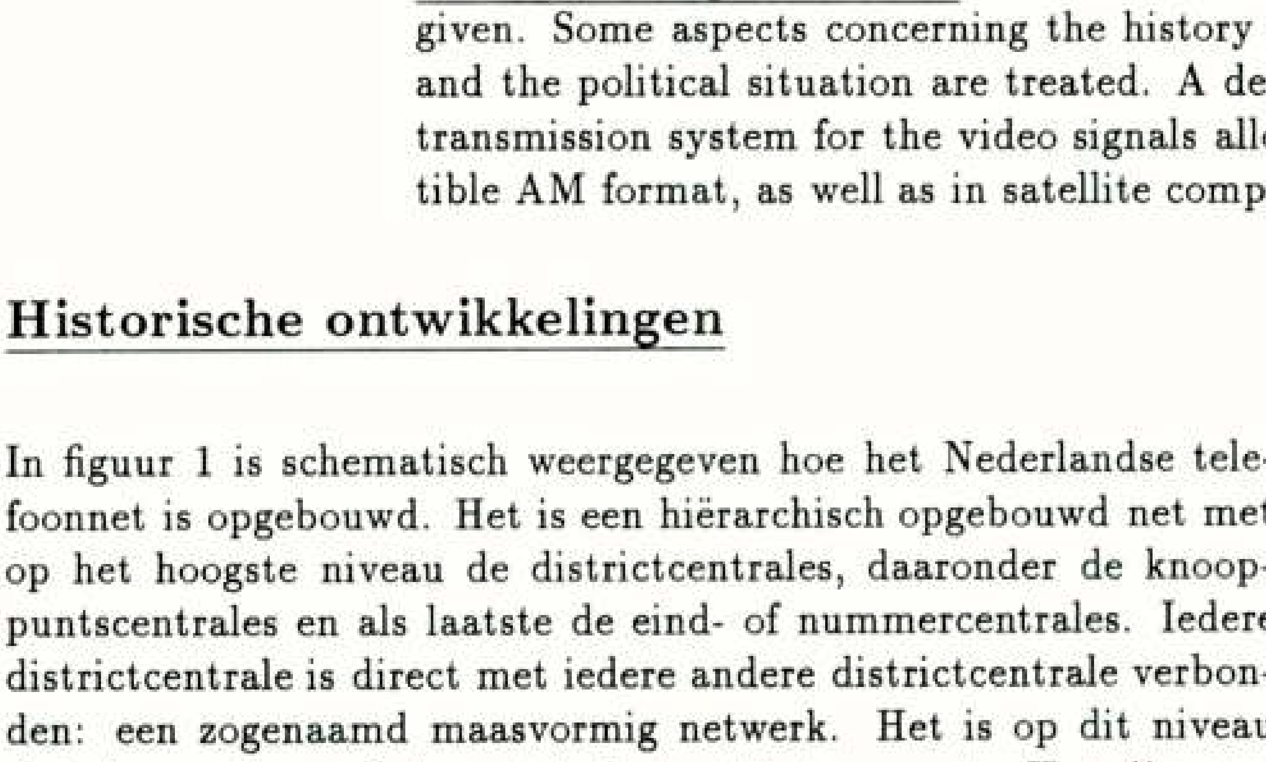
HDTV via glasvezel

ir. H.T. Nijnuis
PTT Research Netwerktechnologie

HDTV via optical fibre. An introduction scenario for optical fibre in the local loop is given. Some aspects concerning the history of optical communication, the size of the market and the political situation are treated. A description is given of two planned field trials. The transmission system for the video signals allows the delivery of HDTV signals in coax compatible AM format, as well as in satellite compatible FM format.

Historische ontwikkelingen

In figuur 1 is schematisch weergegeven hoe het Nederlandse telefoonnet is opgebouwd. Het is een hiërarchisch opgebouwd net met op het hoogste niveau de districtcentrales, daaronder de knooppuntscentrales en als laatste de eind- of nummercentrales. Iedere districtcentrale is direct met iedere andere districtcentrale verbonden: een zogenaamd maasvormig netwerk. Het is op dit niveau dat glasvezel voor het eerst in het net is toegepast. Het zijn over het algemeen vrij lange verbindingen met veel verkeer. In de tijd dat de glasvezeltechnologie nog vrij duur was, waren dit de aangewezen verbindingen om in glas te realiseren. Langzamerhand is de glastechnologie echter ook doorgedrongen in de lagere niveaus tot ongeveer aan het niveau van de nummercentrales. Het niveau onder deze centrales wordt het lokale net genoemd. Alleen al op grond van de historische ontwikkelingen zou dus verwacht kunnen worden dat ook het lokale net wel eens een keer in aanmerking zou moeten komen voor verglazing.



Figuur 1: Schematische weergave van de opbouw van het Nederlandse telefoonnet

Marktverwachtingen

Het lokale net in Nederland bestaat uit ongeveer 7 miljoen lijnen met een gemiddelde lengte van 2 kilometer. In principe dus een markt van 14 miljoen vezel kilometers. Vergeleken met de hoeveelheid vezel die in de hogere netvlakken is verwerkt is dit ontzettend veel. Dit geldt niet alleen voor de hoeveelheid glasvezel maar natuurlijk nog veel meer voor de optische en opto-elektronische componenten die nodig zijn voor optische communicatieverbindingen. Vanwege de marktomvang is het lokale net dus ontzettend belangrijk.

Politieke randvoorwaarden

Een derde reden om aan te nemen dat glasvezel in het lokale net toegepast zal gaan worden is de volgende. Momenteel is de meerderheid van de Nederlandse huishoudens aangesloten op twee lokale netten:
één smalbandig net voor tweewegverkeer (het telefoonnet), en één breedbandig net voor eenrichtingsverkeer (het CATV of kabelnet).
Er zijn op dit moment twee ontwikkelingen gaande:
In de eerste plaats zijn er tendensen die erop wijzen dat in het breedbandige net een retourkanaal wordt gecreëerd. In de tweede plaats neemt de behoefte aan bandbreedte in het smalbandige net toe. Op de achtergronden van deze ontwikkelingen wordt in de volgende paragraaf nader ingegaan. Het effect zou dus kunnen zijn dat op termijn de situatie gecreëerd wordt dat iedere klant aangesloten is op twee gelijkwaardige netwerken: namelijk twee breedbandige netten die beide geschikt zijn voor tweewegverkeer. Het zou geen verbazing hoeven te wekken als die beide netten ook nog eens in glasvezel zouden zijn uitgevoerd.

De regering heeft ingezien dat in de toekomst een Nederlands huishouden op dubbele kosten gejaagd zou kunnen worden door een abonnement op twee gelijkwaardige netten. De regering stelde daarop de commissie Zegveld in, die dit probleem moest bestuderen. Deze commissie kwam, heel in het kort, met het advies om in Nederland de aanleg en het beheer van glasvezel in het lokale net aan de PTT over te laten. PTT zou dan wel het net open moeten stellen ten behoeve van derden voor het aanbieden van diensten. Hoewel het advies van de commissie niet is overgenomen, heeft de PTT in het advies wel een reden gezien om het onderwerp glasvezel in het lokale net met voortvarendheid ter hand te nemen. Wat PTT tot nu gedaan heeft en over de verdere plannen zal dit artikel handelen. Ook de ontwikkelingen met betrekking tot HDTV zullen aan de orde komen.

De klanten van PTT

Voordat een net ontworpen kan worden, zal nagegaan moeten worden wat dat net moet kunnen. In tabel 1 is aangegeven wat er nu en in de toekomst geleverd zal worden aan de klanten. Voor de duidelijkheid is er een onderscheid gemaakt tussen zakelijke klanten en particuliere klanten.

- Zakelijke klanten:
  - telefonie (PABX)
  - huurlijnen
  - MAN's (DQDB)
  - dubbele routering
- Particuliere klanten:
  - telefonie (S-ISDN)
  - CATV (HDTV)
  - betaal TV
  - breedbanddiensten
  - B-ISDN

Tabel 1: Overzicht van huidige en toekomstige diensten voor particuliere en zakelijke klanten

Zakelijke klanten zijn formeel gedefinieerd als klanten met meer dan 5 netlijnen. Behalve aan telefonie, meestal via een huisautomaat (een PABX) hebben de zakelijke klanten behoefte aan huurlijnen, meestal voor het verzenden van computerdata, en aan een aansluiting op een zogenaamd Metropolitan Area Network (MAN). Een MAN kan opgevat worden als een gesloten netwerk, voor meerdere bedrijven, dat de PTT aanlegt en beheert. Omdat voor bedrijven de telecommunicatie in toenemende mate van vitaal belang is, vragen sommige klanten aan PTT een dubbel gerouteerde verbinding. Dit zijn twee identieke verbindingen die zoveel mogelijk geografisch gescheiden wegen volgen, zodat bij een calamiteit in de ene verbinding de andere overblijft voor de telecommunicatievoorziening. Over zakelijke klanten zal in de rest van dit artikel niet meer gesproken worden. Het is alleen van belang om te weten dat er bij het ontwerp van het glasvezelnet naar gestreefd is om n kabelnetwerk aan te leggen voor gebruik door zowel zakelijke als particuliere klanten.

Als naar de telecommunicatiebehoefte van de particuliere klanten gekeken wordt, dan is daar uiteraard weer de telefonie. Eventueel kan dat in de toekomst veranderen in een smalband ISDN-aansluiting. Tevens zal de particuliere klant behoefte hebben aan een CATV-aansluiting, waar, zodra dat aan de orde is, HDTV-signalen op beschikbaar moeten zijn. Verder kan verwacht worden dat de behoefte aan betaal-TV-diensten zal toenemen. Daaronder wordt verstaan (in oplopende technische moeilijkheid): abonnee TV, pay-per-view en tele-videotheek. Om deze diensten te kunnen realiseren zal een retourkanaal in het net nodig zijn, met name voor de tele-videotheek.

Als nog wat verder in de toekomst gekeken wordt, kan ook bij particuliere klanten een toenemende behoefte aan breedbandige dataverbindingen geconstateerd worden. Achtergrond voor deze verwachting is het toenemende bezit en gebruik van personel computers, de groei van het aantal telewerkers, of meer in het algemeen, de toenemende informatiebehoefte van mensen. De uiteindelijke bedoeling is dat al dit soort diensten geïntegreerd gaan worden in het zogenaamde Breedband Integrated Services Digital Network (B-ISDN). Bij het ontwerp van een glasvezelnet moet rekening gehouden worden met dit soort ontwikkelingen. Als het net in een eerste fase niet geschikt is voor bijvoorbeeld breedband ISDN is dat geen ramp, als het er maar op termijn voor geschikt gemaakt kan worden.

Deze laatste zin is wellicht wat cryptisch: 'eerste fase', 'geschikt maken voor'. Wat daarmee bedoeld wordt, zal in de volgende paragraaf duidelijk gemaakt worden.

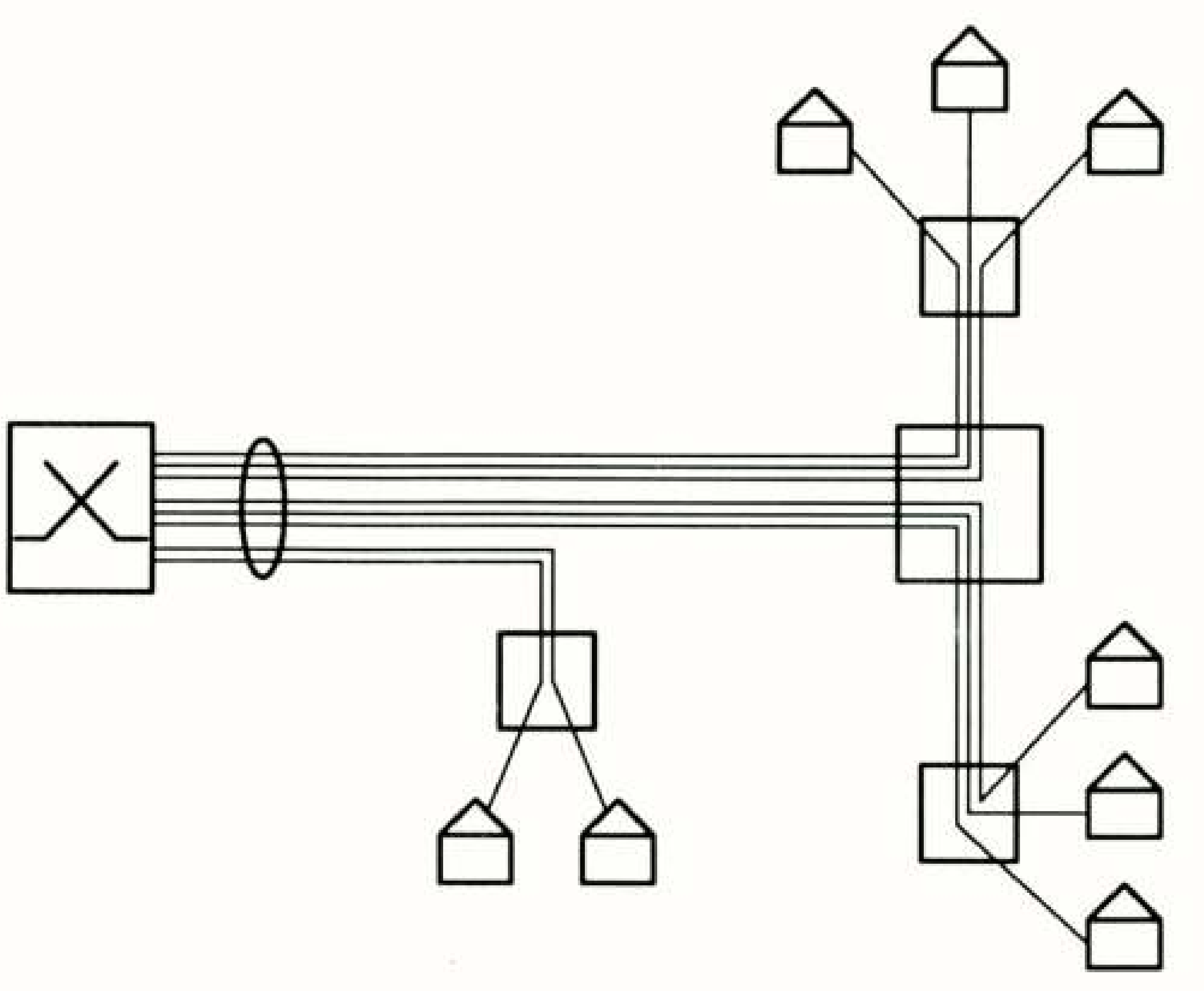
Randvoorwaarden voor het net

Waar men bij het ontwerp van een glasvezelnet al gauw tegen aanloopt zijn twee zeer zware randvoorwaarden, namelijk kosten en compatibiliteit. Het is natuurlijk prima dat de klant straks behoefte heeft aan veel bandbreedte en nieuwe diensten, maar voorlopig zijn dat voorspellingen, meer niet. Daar kan de PTT proberen rekening mee te houden, maar ze kan niet vanaf nu voor miljarden in glasvezel investeren in de hoop dat er wel eens een tijd komt dat die vezels ook daadwerkelijk gebruikt zullen worden. Als er een glasvezelnet aangelegd wordt, dan zal dat net ook direct gebruikt moeten gaan worden, en wel voor de huidige, bekende diensten: telefonie en kabel-TV. Dat een dergelijk net een zekere meerwaarde heeft voor toekomstige zaken is prettig, maar dat mag niet tot uitdrukking komen in de kosten. Dat wil dus zeggen dat een glasvezelnetwerk niet veel meer mag kosten dan een telefoon- en kabel-TV netwerk tesamen. Hiermee wordt dan meteen de tweede randvoorwaarde geraakt: de compatibiliteit. De PTT kan natuurlijk niet van klanten verlangen dat deze vanaf het moment dat ze aangesloten worden op een glasvezelnet een nieuw telefoontoestel kopen en hun TV-toestel vervangen. Daar zal een klant, terecht, weinig begrip en waardering voor op kunnen brengen. Wanneer er glasvezelnetwerken aangelegd worden voor de huidige diensten, dan zal er ook voor gezorgd moeten worden dat uit dat net signalen komen die de klant direct kan gebruiken met zijn huidige apparatuur. Met andere woorden: het net moet compatibel zijn.

Hoe kan een en ander nu gerealiseerd worden, rekening houdend met deze twee randvoorwaarden, maar ook rekening houdend met allerlei nieuwe ontwikkelingen. Het antwoord ligt natuurlijk voor de hand: een net ontwerpen dat in eerste instantie vrij beperkte mogelijkheden heeft, in feite hoeft het alleen maar de diensten telefonie en kabel-TV te leveren, maar dat wel goedkoop is en dat vrij eenvoudig op te waarderen is zodra dat nodig is.

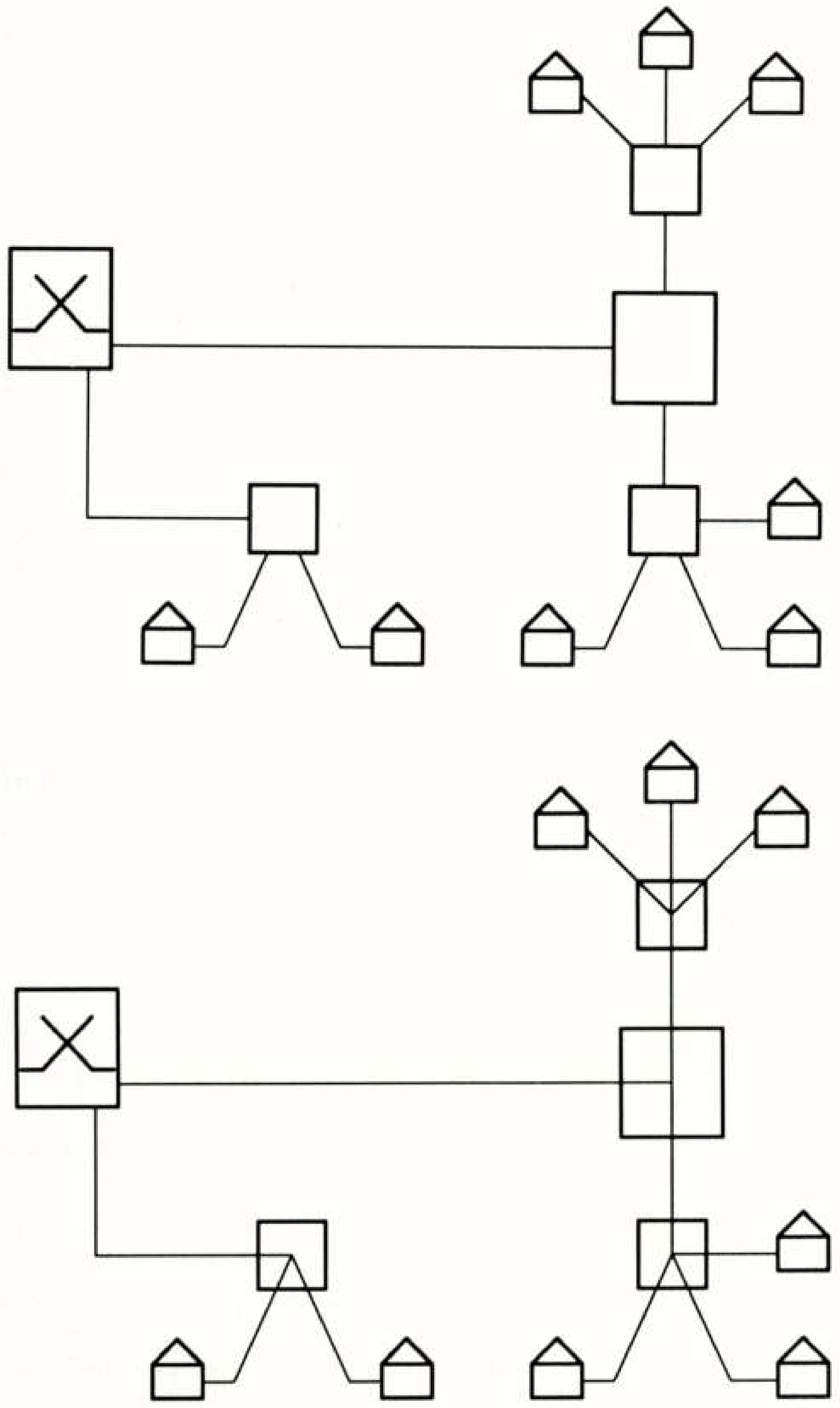
Mogelijke netconcepten

Er zijn diverse structuren mogelijk voor een glasvezelnet. Allereerst en wellicht het meest voor de hand liggend is de zogenaamde langarmige ster (figuur 2a). Hierin is iedere klant via een eigen vezel verbonden met de centrale. Vanuit de centrale worden kabels gelegd met daarin veel vezels. Naarmate de kabel dichterbij de klanten komt, wordt hij uitgesplitst in dunnere kabels tot uiteindelijk een één-vezel kabel naar de klant gebracht kan worden. Hoewel dit misschien een vrij voor de hand liggende structuur is, hebben kostenberekeningen uitgewezen dat dit – vooralsnog – een te duur concept is. Om de kosten te drukken zullen meerdere klanten gebruik moeten maken van één vezel en van apparatuur in de centrale. In het Engels wordt dat fibre sharing en equipment sharing genoemd.



In figuur 2b is aangegeven hoe zoiets gerealiseerd kan worden. In het veld worden op diverse plaatsen kasten geplaatst. Die worden verdeelpunten, distributiepunten of mini-sterren genoemd. In deze kasten wordt multiplex-apparatuur geplaatst. Een groot nadeel van

dit soort oplossingen is dat actieve apparatuur op zeer veel onbewaakte locaties staat opgesteld. Uit oogpunt van betrouwbaarheid, beschikbaarheid en veiligheid is dit ongewenst. Uit oogpunt van veiligheid zou de apparatuur ondergronds opgesteld kunnen worden maar, nog afgezien van de kosten die dat met zich meebrengt, worden daar nog niet de problemen van de betrouwbaarheid en beschikbaarheid mee opgelost.
Een ander nadeel van deze oplossing is, dat bij toevoeging aan het net van nieuwe diensten, op alle locaties apparatuur bijgeplaatst of vervangen moet worden. Een dergelijk net kan dus niet erg toekomstvast genoemd worden.



Figuur 2: Mogelijke netstructuren: a langarmige ster; b net met actieve straatkasten; c passieve boom

Toch wordt in het buitenland dit soort oplossingen wel toegepast. De laatste uiteinden van het net (dus tussen de woning van de klant en het mini-sterpunt) worden dan nog vaak in koper (twisted pair en/of coax) uitgevoerd. Men spreekt in zo'n geval van Fibre To The Curb (stoeprand). Het wordt gezien als een tussenstap naar het uiteindelijke doel: Fibre To The Home.
Om toch een volledig passief netwerk te kunnen realiseren, waarin wel het principe van fibre en equipment sharing wordt toegepast, is gekozen voor een net zoals in figuur 2c is geschetst, echter nu wordt in de verdeelpunten geen apparatuur geplaatst, maar in plaats daarvan een passieve optische splitser. Deze splitser kan het licht dat vanaf de centrale komt, verdelen over meerdere uitgangsvezels. Deze verdeling is over een groot golflengtegebied onafhankelijk van de golflengte. Dat betekent dat in de centrale meerdere diensten, ieder op een eigen golflengte, via golflengtemultiplex-technieken op het net gezet kunnen worden. Een zekere toekomstvastheid van het net kan bereikt worden door enige golflengten te reserveren voor toekomstig gebruik. Een verdere toekomstvastheid wordt verkregen door het net zodanig aan te leggen dat in een later stadium het net om te vormen is naar een langarmige ster. Een dergelijk net wordt een passief optische boom genoemd. Op de praktische implementatie van het net, zoals kabeltypen, installatiemethoden en dat soort zaken, zal nu niet verder ingegaan worden. Het is wellicht alleen nog interessant om te weten dat besloten is om zakelijke klanten niet op een passief optische boom aan te sluiten, maar in plaats daarvan op een langarmige ster. Daartoe worden enige extra vezels gelegd naar de mini-ster punten.

Transmissie-aspecten

Het zal duidelijk zijn dat een passief optische boom, vanuit transmissietechnisch oogpunt bekeken, beperkte mogelijkheden heeft. Zoals echter al gezegd is hoeft dat voor de eerste fase van de levensduur van het netwerk geen probleem te zijn. Voorwaarde is natuurlijk wel dat de twee basisdiensten, telefonie en TV-distributie, geleverd kunnen worden. Voor distributie-doeleinden kan het net uiteraard uitstekend gebruikt worden, zij het dat door de vermogenssplitsing flink wat demping geïntroduceerd wordt. Om op een dergelijke boom communicatief verkeer te kunnen laten plaatsvinden zal echter behoorlijk gecompliceerde apparatuur, met name aan de klantzijde, nodig zijn. Het transport van telefoniesignalen gebeurt digitaal en gemultiplexed. Bij de klant wordt gedemultiplexed, zodanig dat alleen de voor de desbetreffende klant bestemde bits beschikbaar komen. Bij de klant vindt ook analoog/digitaal omzetting, belstroomverzorging, hook on/off signalering, etc. plaats, zodat normale telefoontoestellen aangesloten kunnen worden. Dit was immers een randvoorwaarde. Het systeem waarmee de telefonie verzorgd wordt is een gemodificeerde versie van het Britse TPON-systeem. TPON staat voor Telephony On Passive Optical Networks.

Te overbruggen demping:

	Aantal	Tel	TV
optische vork	2	8.0	-
splitsing 1 → 32	1	20.3	20.3
golfl. mux	2	0.4	0.4
lassen (.2 dB/)	10	2.0	2.0
connectoren	1	0.5	0.5
kabelbreukmarge	2	0.4	0.4
vezeldemping	3 km	1.2	1.2
		33.0	25.0

Tabel 2: Globale berekening van de optredende demping in een passief optische boom voor respectievelijk het telefonie- en het TV-systeem

Zoals reeds opgemerkt, wordt door de vermogensverdeling nogal wat demping geïntroduceerd. Tabel 2 geeft een globale berekening van de te verwachten demping tussen de centrale en de klant. Deze berekening geldt voor een splitsverhouding van 1 naar 32. Zoals uit de tabel af te lezen valt, is er nogal wat verschil tussen de demping voor de twee systemen. Dat wordt veroorzaakt door de twee extra splitsers die in het telefoniesysteem nodig zijn om de heen- en terugweg van elkaar te scheiden. Omdat de transmissie van het telefoniesignaal echter digitaal is, levert deze hoge demping in het geheel geen probleem op. De problemen zitten veel meer in de demping voor het distributiesysteem. Voor dit systeem wil men namelijk analoge transmissie toepassen. Waarom analoog zult u zich afvragen. Immers glasvezel en de bijbehorende elektro-optische componenten lenen zich bij uitstek voor digitale transmissie. Het antwoord op de vraag is vrij simpel. Digitale signalen zijn niet

compatibel met de huidige randapparatuur. Om de signalen compatibel te maken bij de klant vergt veel apparatuur en is daarom te duur. Dus uit kostenoogpunt en de benodigde hoeveelheid apparatuur wordt voorlopig gekozen voor analoge TV-distributie.

Analoge TV distributie

Het is duidelijk dat voor analoge transmissie in ieder geval componenten nodig zijn die zeer lineaire eigenschappen bezitten. In de begintijd van de optische transmissie liepen systeemontwikkelingen vaak stuk op het gebrek aan componenten met voldoende lineariteit. Er zijn echter tegenwoordig elektro-optische componenten verkrijgbaar die wat lineariteit betreft uitstekend bruikbaar zijn. Behalve aan lineariteit stellen analoge systemen echter ook heel hoge eisen aan de ruis. Bij de distributie van TV-signalen over coax wordt als eis gesteld dat de signaal-ruis verhouding 45 dB moet zijn (bij de klant, gemeten op de wandcontactdoos). Ter vergelijking: bij digitale transmissie is een signaal-ruis verhouding van 20 dB al voldoende voor een ruisvrij TV-beeld. Wanneer over glas dezelfde modulatiemethode als bij de coax gebruikt wordt, (rest-zij band amplitude modulatie, AM VSB) zal dus bij de klant een signaal-ruis verhouding van 45 dB gerealiseerd moeten worden.
Aangezien het generen van licht in een laser en het omzetten van licht in elektrische signalen bij de detector stochastische processen zijn, is optische transmissie per definitie niet ruisvrij. De grootste ruisbron is de laser. De ruis ervan neemt nog toe onder invloed van reflecties uit het optische pad. Deze reflecties kunnen echter tegenwoordig heel goed onderdrukt worden met optische isolatoren. Door zeer speciale ontwerpen kunnen lasers gemaakt worden die, ook mede door de toepassing van deze isolatoren, een ruisgetal hebben van -150 dB/Hz. In tabel 3 is aangegeven hoe met dit getal omgegaan moet worden om de signaal-ruis afstand in het optische domein te berekenen. Als uitgegaan wordt van een videobandbreedte van 5 MHz, moet van het getal 150 al 67 dB afgetrokken worden. Bovendien moeten er tenminste 30 kanalen naar de klant gebracht worden, waardoor het optisch vermogen over 30 kanalen verdeeld moet worden. Voor de signaal-ruisverhouding betekent dit een verdere verslechtering van 26 dB. Dit is een worst-case benadering. In de praktijk zal deze verslechtering minder zijn, omdat niet alle kanalen tegelijkertijd maximaal uitgestuurd zullen worden. Vlak na de laser bedraagt de signaal-ruisverhouding dus bijna 60 dB. Ter vergelijking: een standaard laser heeft een ruisgetal van -125 dB/Hz. Een dergelijke laser is onbruikbaar voor analoge TV-transmissie, omdat vlak na de laser al niet meer voldaan wordt aan de systeemeis.

RIN	:	-150 dB/Hz
SNR in 5 MHz	:	150 - 10 log (5×10^6) = 83 dB
Modulatie-index		
bij 30 kanalen	:	3 á 5 %
		20 log 0.05 = -26 dB
SNR	:	83 -26 = 57 dB

Tabel 3: Omrekening van het ruisgetal van de laser (Relative Intensity Noise, RIN) naar signaal-ruisverhouding (SNR) in het optische domein bij een gegeven videobandbreedte en modulatie-index

Aan de ontvangstzijde is een bepaalde hoeveelheid optisch vermogen nodig om 45 dB boven de thermische ruis uit te komen. Dit vermogen kan als volgt berekend worden:
Stel we hebben een ontvanger die een thermische ruisstroom van $7\text{pA}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$ genereert. Gemeten over 1 Ω betekent dit een elektrisch vermogen van 49 x $10^{-24} A^2 \cdot \Omega/\text{Hz}$. In een bandbreedte van 5 MHz is dit 2.5 $\times$ 10^{-16} W. De eis is dat het signaalvermogen 45 dB sterker is dat het ruisvermogen:

$$P_{sign} = 10^{4.5} \times 2.5 \times 10^{-16} W \qquad (1)$$

Om dit vermogen te genereren moet er door dezelfde 1 Ω weerstand een stroom lopen van 3×10^{-6} A. Bij een responsiviteit van de detector van 1 A/W betekent dit een benodigd optisch vermogen van 3 μW. Dit is het vermogen per TV kanaal. Bij 30 kanalen moet er dus totaal 90 μW (ca. -10 dBm) bij de klant geleverd worden.
Als op de ontvanger -10 dBm nodig is, terwijl de optische demping tussen zender en ontvanger 25 dB bedraagt (tabel 2), dan betekent dit dat de bron een vermogen moet uitzenden van +15 dBm (25 mW). Een halfgeleiderlaser met een dergelijk hoog vermogen, met tegelijkertijd de vereiste lineariteit en ruiseigenschappen is momenteel nog niet verkrijgbaar. Binnenkort komen er bronnen op de markt met een vermogen van 6 mW. Het einde van de ontwikkelingen is daar echter nog niet mee bereikt. Bij de PTT gaat men er van uit dat bij een project dat in 1993 in bedrijf moet gaan, er bronnen beschikbaar zijn die bij benadering de gewenste specificaties halen.

FM-transmissie

In de voorgaande paragraaf is een berekening gedaan aan een systeem dat in staat is om signalen te leveren over een passief optische boom. Deze signalen zijn, na opto-elektrische omzetting, volledig compatibel met normale kabel TV-signalen. De consument kan echter ook via de satelliet TV-signalen ontvangen. Met name in het buitenland is er veel consumentenapparatuur verkrijgbaar voor deze vorm van TV-distributie. Bovendien ziet het er naar uit dat voor HDTV de satelliet een zeer belangrijk distributiemiddel gaat worden. Het ligt dus voor de hand om te kijken of voor de glasvezel een transmissiesysteem gemaakt kan worden, dat in staat is om signalen te transporteren, die compatibel zijn met de satelliet. De belangrijkste eisen waaraan een dergelijk systeem moet voldoen zijn:

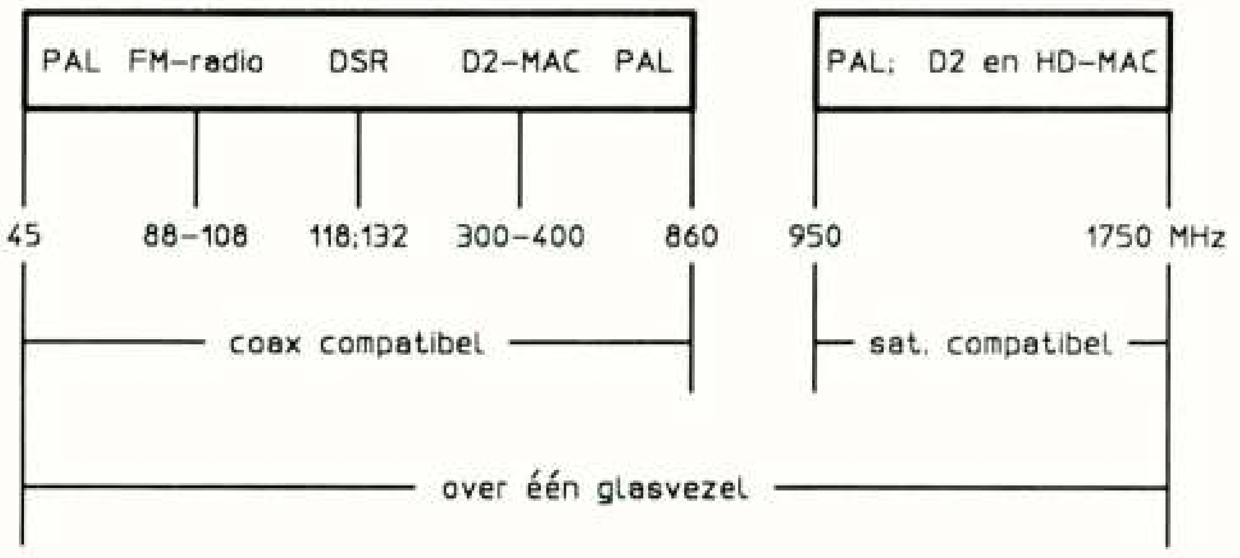
Frequentie	:	950 -1750 MHz
Modulatie	:	FM
Bandbreedte/kanaal	:	27 of 36 MHz
CNR	:	ca. 15 dB
Standaarden	:	PAL, D2-MAC, HD-MAC

De eerste eis, het frequentiegebied, geeft aan dat een dergelijk systeem niet te realiseren is voor coax. Voor de glasvezel is het echter geen enkel probleem. Ook de andere eisen leveren geen problemen. Sterker nog: omdat voor dit soort FM-gemoduleerde systemen een veel lagere eis geldt voor de ruis, zijn zij veel eenvoudiger te realiseren dan een systeem met amplitudemodulatie. Bij de systeemparameters zoals die voor satelliettransmissie gekozen zijn, bedraagt de FM winst ca. 30 dB.

Frequentie-indeling op de glasvezel

Het zal duidelijk zijn dat als men in staat is om een AM VSB systeem te ontwikkelen voor een passief optische boom, het relatief eenvoudig is om daar een FM-systeem bij te zetten. Op de vezel en bij de klant wordt dan het volgende frequentieraster verkregen (figuur 3). Wat betreft het AM gedeelte tot 860 MHz worden de ontwikkelingen gevolgd die op de kabel plaatsvinden. Dat wil zeggen een kleine dertig PAL TV-kanalen (VHF en UHF), 30 FM-radiokanalen (88-108 MHz), Digitale Satelliet Radio op 118 en 132 MHz en een aantal D2-MAC-kanalen tussen de 300 en 400 MHz. Het volgen van de ontwikkelingen is bedoeld om zoveel mogelijk service aan de klant te kunnen leveren. Iemand die in een kabelgebied woont en die verhuist naar een glasvezelgebied kan zijn apparatuur gewoon blijven gebruiken. Datzelfde geldt als een kabelgebied wordt

verglaasd. In een glasvezelgebied kan de klant bovendien iets extra's geboden door middel van het FM-systeem, dat werkt in het frequentiegebied tussen 950 en 1750 MHz. De klant krijgt hier de beschikking over signalen die volledig compatibel zijn met satellietsignalen. Dat kunnen extra PAL-signalen zijn, maar op wat langere termijn zullen dat waarschijnlijk voor het merendeel D2- of HD-MAC signalen zijn. Voor de ontvangst van deze signalen zal de klant echter wel over moeten gaan tot de aanschaf van een satelliettuner of een TV-toestel waar een dergelijke tuner is ingebouwd.



Figuur 3: Frequentie-indeling op de glasvezel

Veldproeven

Dat het vorenstaande serieus genomen moet worden mag blijken uit het feit dat de PTT van plan is om in 1996 glasvezel op grote schaal in het lokale net te introduceren. Om dit te kunnen realiseren worden momenteel twee proeven voorbereid. De eerste is de veldproef 'Sloten' die in april van dit jaar in dienst is gegaan. Het gaat hier om een samenwerking tussen PTT en de Kabel Televisie Amsterdam (KTA). Dat wil zeggen dat hier gewerkt wordt volgens het Zegveld-model: PTT bouwt en onderhoudt het net, terwijl een derde partij diensten aanbiedt. KTA is verantwoordelijk voor het FM TV-pakket van circa 16 programma's. Zij heeft hierover overleg gepleegd met de Programmaraad van de gemeente en de auteursrechtelijke zaken geregeld. Zoals gezegd bestaat er momenteel nog geen werkend AM-systeem voor het glas, vandaar dat de woningen ook nog op coax zijn aangesloten .

Om te kunnen garanderen dat de telefoon van de klant blijft werken zal naast het glasvezelnet een conventionele telefoonaansluiting in koper aangebracht worden. Dit wordt zodanig gedaan dat het net automatisch overschakelt naar koper, mocht er zich een storing voordoen in het glasvezelnet. Het betreft hier per slot van rekening een proef en de klant mag hier niet de dupe van worden. Op het net zullen circa 300 klanten worden aangesloten. Het doel van de proef is na te gaan hoe een glasvezelnet aangelegd moet worden en hoe betrouwbaâr het kan functioneren. De apparatuur wordt door twee leveranciers geleverd, namelijk Philips en AT&T. Deze apparatuur is door hen in nauw overleg met de PTT ontwikkeld.
Het tweede project dat in voorbereiding is, is het zogenaamde IJ-as project. Dit mag al geen proef meer genoemd worden, omdat hier niet meer sprake zal zijn van koperaansluitingen. Er zal dan AM TV geleverd worden via de glasvezel. Er wordt dus vanuit gegaan dat in 1993 een AM-systeem beschikbaar zal zijn. HDTV, in de vorm van HD-MAC, zal zowel via het AM- als het FM-systeem geboden worden. Audio zal geboden worden in de vorm van FM-radio en DSR. Het IJ-as project is een etalageproject van PTT Telecom. Met name op het gebied van nieuwe diensten wil men hier laten zien wat er voor zakelijke en particuliere klanten allemaal mogelijk wordt. In latere fasen zal het dienstenpakket dus aanzienlijk uitgebreid gaan worden, onder andere met een systeem dat breedband-diensten mogelijk moet maken. De eerste fase van het project zal in het najaar van 1993 in dienst gesteld worden. De omvang zal uiteindelijk 2500 particuliere en 500 zakelijke klanten gaan worden.

Conclusies

In dit artikel is getracht duidelijk te maken waarom glasvezel in het lokale net kan worden verwacht. Ook wordt uitgelegd hoe over deze glasvezelnetten HDTV geleverd zou kunnen worden. Uit de geplande veldproeven kan geconcludeerd worden dat de PTT serieus met dit onderwerp bezig is. Het ligt in de bedoeling om in het begin van de tweede helft van het huidige decennium een daadwerkelijk begin te maken met de verglazing van het lokale net.

Voordracht gehouden tijdens de 385e werkvergadering.

UIT HET NERG

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden

P.G.M. de Bot, Willemstraat 80, 5616 GE Eindhoven
Ing. H.C. Milius, Erberveltstraat 27, 2651 GE Berkel en Rodenrijs
Ir. E. Bouwmeester, M.H. Tromplaan 30, 7513 AB Enschede

Nieuwe leden

Mw ir. J.C. Vonk, Gravin Catharinalaan 24, 2263 TN Leidschendam
Ir. A.N. Aulia, Arthur van Schendellaan 55, 2624 CR Delft
Ir. E.A. Kuijpers, Rode Kruislaan 1515, 1111 XE Diemen
Drs. W. Pelt, Pisuissestraat 431, 2553 BN Den Haag
Ir. J.C. van der Plaats, Reigerskamp 415, 3607 HZ Maarsen
Ir. D.A. Schinkel, S. Streuvelsplantsoen 25, 2182 ZG Hillegom
Ing. H. Speelman, Burg. Meyboomstraat 24, 2231 LD Rijnsburg
Ir. P.K. Tilburgs, Oude Pyramide 65, 3962 HK Wijk bij Duurstede
Ir. P.A. van Wijk, E. du Perronlaan 342, 2624 NC Delft
Ir. O. Kilic, J.F. Kennedystraat 11, 9728 RB Groningen

Nieuwe adressen van leden

Ir. E.K. v.d. Berg, Lemferdinge 6, 9472 XZ Zuidlaren
Ir. P.A. Beekman, Koraalzwam 96, 2403 SN Alphen a/d Rijn
Ir. J. Bruijn, Asseltsestraat 272, 7312 DC Apeldoorn
Ir. A. Diekema, Soestdijkseweg Noord 474, 3723 HM Bilthoven
Ir. M.O. de Droog, Waddenstraat 85, 2036 LB Haarlem
Ir. E. Drijver, Buys Ballotstraat 27, 2313 TV Leiden
Ir. A.W. Folmer, Noord Buitensingel 31, 5911 EL Venlo
Ir. C.A.M. Geus, Agaat 24, 2719 GE Zoetermeer
Ir. G.J. de Groot, Rijswijkseweg 696, 2516 HZ Den Haag
Ir. E. de Groot, Ruiterakker 129, 9407 BH Assen
Ir. R. Hagendoorn, Carel Fabritiuslaan 29, 2343 SE Oegstgeest
Ir. P.A. Hargitai, De Scheerder 50, 5506 BM Veldhoven
Ir. J.J. Jacobs, Joan Maetsuyckerstraat 87, 2593 ZE Den Haag
Ir. F.J.M. Kuppeveld, Beeklaan 490-II, 2562 BM Den Haag
Ir. A.V.P. v.d. Linden, Burgemeesterpark 10, Driebergen
Ir. J.M.G.A. Ouderling, Satelietlaan 10, 9602 MA Hoogezand
Ir. J. v.d. Rhee, Zomeroord 9, 7361 GK Beekbergen
Ir. E. van Slee, Hoekerkade 155, 2725 AJ Zoetermeer
Mw. J.M. Scarr, Dirklangenstraat 54, 2611 HV Delft
Ir. J.R. Schmidt, Akeleituin 5, 2317 NC, Leiden
Ir. M.J.H. van Veen, Veenendaalkade 415, 2547 AL Den Haag
Ing. H.J.T. v.d. Vleut, Herberg 93, 2264 KR Leidschendam
Ir. M.A. Warmelink, Terweeweg 86, 2341 CV Oegstgeest
Ir. K.J. Wouda, Garonnelaan 37, 5627 VW Eindhoven

Conferentie-aankondigingen

VDE-ITG-Conferentie: Vacuum electronics and displays. 4-5 May 1992 in Garmisch Partenkirchen.
Contactadres: VDE-Zentralstelle Tagungen, Stresemannallee 15, D-6000 Frankfurt am Main 70. Tel. 0949-696308, toestel 202.

Private Switching Systems and Networks. 23-25 June 1992.
The institution of electrical engineers, Savoy Place, London WC 2 R – OBL, U.K.
Contactadres: PSSN secretariat Conference Services IEE, Savoy Place, London WC 2 R – OBL, U.K. Tel. 071-240 1871. Ext. 222.

21st Intern. Conference on Lightning protection 1992. Berliner Congress Center, September 22-25, 1992.
Contactadres: VDE-Zentralstelle Tagungen, Stresemannallee 15, D-6000 Frankfurt am Main 70. Tel. 0949-696308, toestel 203.

ECOC '92. 18th European Conference on optical communication. 27 September-1 October 1992. Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 1000 Berlin 12, Germany.
Call for papers 14 April 1992.
Contactadres: Organizing Committee ECOC '92; Prof. Dr. C. Baack, Heinrich-Hertz-Institut, Einsteinufer 37, D-1000 Berlin 10, Germany. Tel. 0949-3031002 399/325.

Concept programma NERG 1991-1992

WV+ 391 – avondbijeenkomst
21 november
Ontwikkelingen in audio en video
Leidschendam DNL

WV+ 392 – avondbijeenkomst
3 december
Digital Compact Cassette (DCC)
Academisch Genootschap, Eindhoven

WV+ 393
Januari
Gestandaardiseerd digitaal ontwerpen van chips
Philips, Nijmegen

WV – ochtendbijeenkomst
9 april
Het Instrument, hoogfrequent meten
Jaarbeurs, Utrecht

WV = werkvergadering, uitsluitend voor NERG-leden;
WV+ = werkvergadering, voor NERG-, AES- en IEEE-leden;
WB = werkbezoek, uitsluitend voor NERG-leden;
JV = jaarvergadering, uitsluitend voor NERG-leden;
SMR = semiminar.

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

Inhoud

deel 56 – nr. 4 – 1991

Druk: de Witte, Eindhoven.